

KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Projekt Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine

Die Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage (HHV)

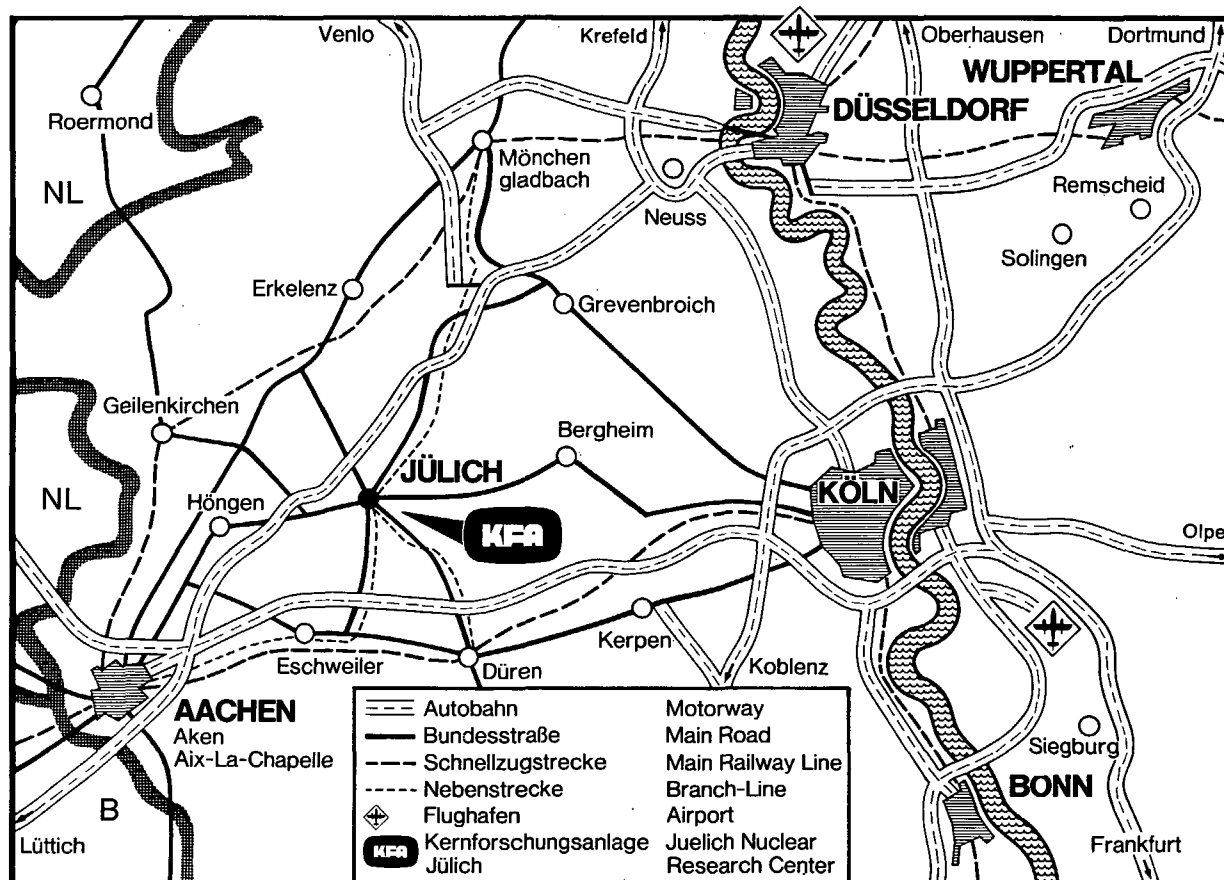
Aufbau und Beschreibung der Anlage

von

G. Noack und H. Weiskopf

Jül - 1403
März 1977

Als Manuskript gedruckt
ISSN 0366-0885



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1403

Projekt Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine Jül – 1403

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

**Die
Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage
(HHV)**

Aufbau und Beschreibung der Anlage

von

G. Noack¹⁾ und H. Weiskopf²⁾

¹⁾ Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage-Betriebsgesellschaft
mbH, Jülich

²⁾ Brown Boveri & Cie AG, Mannheim

Der Bericht ist im Rahmen des Zusammenarbeitsvertrages zwischen den Firmen

BBC Aktiengesellschaft Brown Boveri & Cie, Baden
Brown Boveri & Cie AG, Mannheim
Eidg. Institut für Reaktorforschung, Würenlingen
Gebrüder Sulzer AG, Winterthur
Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Köln
Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich
Nuclear-Chemie und Metallurgie GmbH, Wolfgang
Schweizerische Aluminium AG, Zürich

im Rahmen des von der Bundesrepublik Deutschland, dem Land Nordrhein-Westfalen und der Schweizerischen Eidgenossenschaft geförderten Entwicklungsprogramms

"Kernkraftwerk mit Hochtemperaturreaktor und Heliumturbine
großer Leistung (HHT)"

entstanden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Aufgabenstellung und Auswahl des Schaltungskonzeptes
3. Voraussetzungen und Voruntersuchungen zum Bau der Anlage
4. Beschreibung der Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage
 - 4.1 Kreislaufschema und Anlagenanordnung
 - 4.2 Beschreibung der Einzelkomponenten
 - 4.2.1 Turbomaschine
 - 4.2.2 Antrieb der Turbomaschine
 - 4.2.3 Heißgasleitung
 - 4.2.4 Kühlgas- und Sperrgaskreislauf
 - 4.2.5 Kühlwassersysteme
 - 4.2.6 Ölversorgung und Ölkreislauf
 - 4.2.7 Gasreinigung und Gasversorgung
 - 4.2.8 Stromversorgung
 - 4.2.9 Meß-, Regel- und Steuerungstechnik
 - 4.2.10 Datenerfassung
 - 4.3 Gebäude mit Versorgungseinrichtungen
5. Versuchsvorhaben und Versuchsmöglichkeiten
6. Zusammenfassung
7. Literaturangaben

1. Einleitung

Die Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage (HHV-Anlage) ist Bestandteil des Entwicklungsprogramms für einen Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine großer Leistung (HHT-Projekt). Ziel des Projektes ist das Aufzeigen des technischen und wirtschaftlichen Potentials sowie der Realisierbarkeit von Kernkraftwerken mit Hochtemperaturreaktor und Heliumturbine. Die Arbeiten des HHT-Projektes werden mit Förderungsmitteln der Bundesrepublik Deutschland, des Landes Nordrhein-Westfalen und der Schweizerischen Eidgenossenschaft in Zusammenarbeit von 8 Partnern aus der Bundesrepublik, der Schweiz und den USA durchgeführt.

Das mit der Entwicklung eines Kernkraftwerks mit Heliumturbine gesteckte Ziel verlangt eine dem Bau vorausgehende Erprobung neuer wesentlicher Bestandteile des Helium-Kreislaufes. Da festgestellt wurde, daß für die Aufgabe keine geeignete Versuchsanlage verfügbar war, war es erforderlich, eine Versuchsanlage zu konzipieren, die mit möglichst geringen Kosten folgende Versuchsbedingungen erfüllen kann.

- Der Helium-Massenstrom soll ungefähr 200 kg/s betragen.
- Die Helium-Temperatur soll 850⁰C erreichen und bis auf 1000⁰C erhöht werden können.
- Der Betriebsdruck im Heliumkreislauf ist auf 50 bar festzulegen.
- Die Reinheit des Kreislaufheliums muß den Reaktorbedingungen, jedoch unter Ausschluß der nuklearen Verunreinigungen, entsprechen.
- Die Teststrecke ist für verschiedene Anordnungen und Betriebsbedingungen vorzusehen.

Diese Testbedingungen sollen die Extrapolierbarkeit der Ergebnisse aus dem Versuchsbetrieb der Anlage auf eine zu entwickelnde HHT-Anlage ermöglichen.

Nachdem sich Ende der sechziger Jahre abzeichnete, daß es eine nukleare Prototypanlage mit Gasturbine kleinerer Leistung, die für Geesthacht begonnen wurde, nicht geben würde, gewann die geplante HHV-Anlage an Bedeutung. Sie wurde 1971 dann als integrierender Bestandteil des HHT-Projektes in Umfang und Zeitplan auf die Erfordernisse des damals neu gestalteten HHT-Rahmenprogramms abgestimmt. Im Jahre 1972 erfolgte die Auftragsvergabe für die Anlage /1/ durch die Kernforschungsanlage Jülich. Danach wird die HHV-Anlage von BBC-Mannheim geplant, geliefert und in Betrieb genommen. BBC-Mannheim

führt weiterhin im Auftrag des Staatshochbauamtes für die Kernforschungsanlage Jülich die Planung des Gebäudes mit den Nebenanlagen und der Rückkühlanlage aus. Die Gesamtkosten des Projektes wurden mit ca. 75 Mio DM veranschlagt.

Auf dem Gelände der Kernforschungsanlage Jülich wurde im April 1973 mit den Bauarbeiten begonnen /2/ /3/. Ab Frühjahr 1974 begannen nach Abschluß der Rohbauarbeiten am Gebäude Montagearbeiten an Nebensystemen der Anlage wie zum Beispiel der Rückkühlanlage und dem Gasreinigungs- und -versorgungssystem /4/. Ende 1975 konnten dann die Montagearbeiten an der eigentlichen Anlage beginnen, die bis Ende 1976 soweit geführt wurden, daß die Inbetriebnahme der Anlage ab Frühjahr 1977 erfolgen kann.

Im Jahre 1974 schlossen die Kernforschungsanlage Jülich GmbH und die Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage-Betriebsgesellschaft mbH, Jülich einen Betriebsführungsvertrag, mit dem die Aufgaben der Projektabwicklung auf seiten des Auftragsgebers und die spätere Betriebsführung der Anlage dieser von den vier EVU Badenwerk AG - Karlsruhe, Nordwestdeutsche Kraftwerke AG - Hamburg, Preussische Elektrizitäts AG - Hannover, Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG - Essen gegründeten Gesellschaft übertragen wurden.

2. Aufgabenstellung und Auswahl des Schaltungskonzeptes

Die Bauentscheidung für die HHV wurde in erster Linie unter dem Gesichtspunkt getroffen, mit dieser Anlage Kreislaufkomponenten für HHT-Anlagen zu erproben. Um diese Versuchsaufgabe zu erfüllen, lag es zunächst nahe, die Versuchsanlage als klassischen geschlossenen Gasturbinenprozeß mit Erhitzer und Wärmesenke auszuführen. Bei dieser Lösung sollte ein mit fossilem Brennstoff gefeuerter Erhitzer den Hochtemperaturreaktor ersetzen. Die Teststrecke wäre zwischen dem Erhitzeraustritt und dem Eintritt in die Gasturbine angeordnet worden, wie aus Abb. 1 ersichtlich ist. Bei Realisierung des geforderten Massenstromes von rd. 200 kg/s konnte für einen derartigen Kreisprozeß eine Nutzleistungsgröße von ca. 150 MW veranschlagt werden. Die Nutzung dieser Leistung wurde allerdings durch den zeitweise unterbrochenen und außerdem kurzen Versuchsbetrieb als zu stark beeinträchtigt angesehen. Zu diesem Nachteil kam eine erhebliche Schwierigkeit, die sich bei der Suche

nach einer technisch und wirtschaftlich zufriedenstellenden Lösung des Gas-erhitzers ergab, der das Gas bei 50 bar Betriebsdruck bis auf 1000°C hätte erhitzen können. Wegen der in dem Temperaturbereich stark absinkenden Zeitstandsfestigkeit des Wärmetauschermaterials, der hohen Investitionskosten und des für diesen Erhitzer erforderlichen, jedoch für nukleare Einkreisanlagen nicht benötigten Entwicklungsaufwandes mit entsprechenden Versuchen wurde der Weg des fossil beheizten Gaserhitzers verlassen.

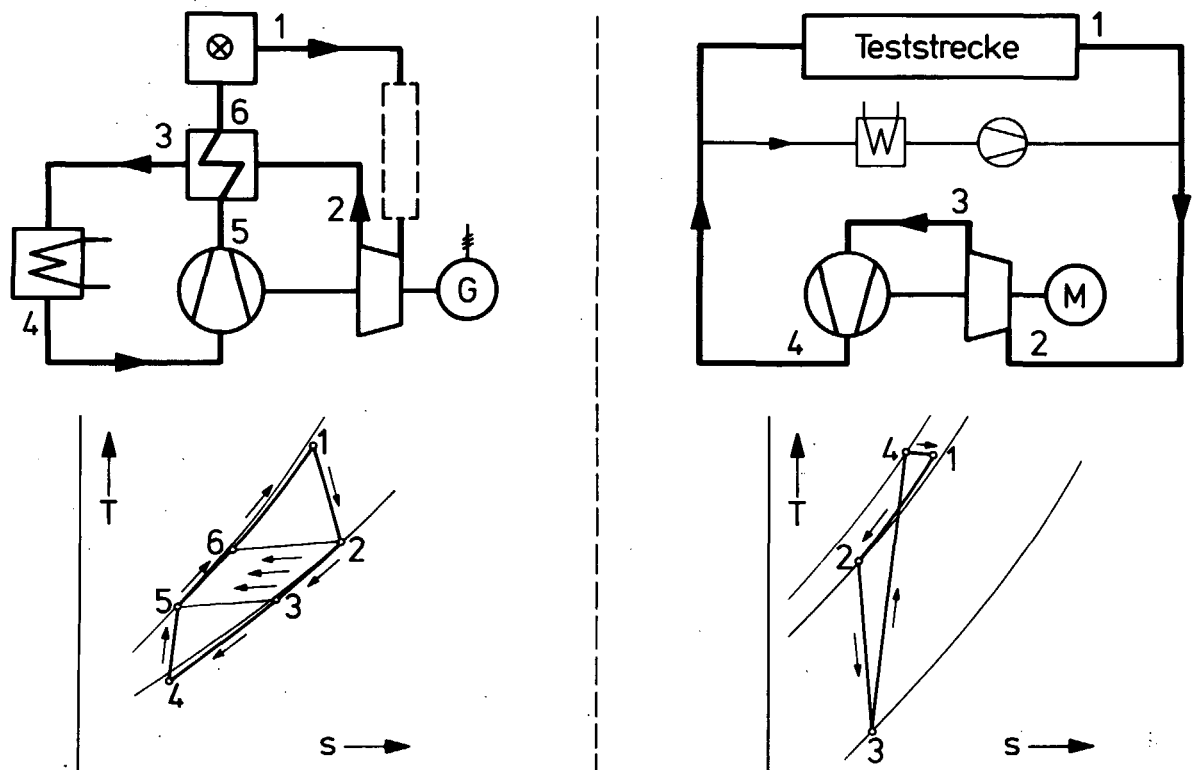


Abb. 1 Schaltungsanordnung für einfachsten geschlossenen Gasturbinenkreislauf (linke Seite) und Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage (rechte Seite) im Vergleich mit Darstellung im T-s-Diagramm

In Zusammenarbeit der Firma BBC, der Kernforschungsanlage Jülich und der Technischen Hochschule Aachen führten Überlegungen als Alternative zu dem klassischen Gasturbinenprozeß auf die Schaltung der HHV entsprechend Abb. 1. Vergleichbar mit dem üblichen geschlossenen Gasturbinenprozeß ist dabei lediglich die eingangs der Turbomaschine erfolgende Expansion im Turbinenteil. Eine vollständig neuartige Variante stellt der direkt sich anschließende Verdichterteil dar, da am Austritt aus diesem Verdichter die höchsten

Kreislauftemperaturen auftreten. Unter dem Gesichtspunkt der eingangs erwähnten Hauptaufgabe für die HHV-Anlage wäre auch der Verzicht auf den Turbinenteil möglich gewesen. In diesem Fall wäre lediglich das Gas im Kreislauf unter Druckerhöhung und Aufwärmung umgewälzt worden und hätte für die Teststrecke zur Verfügung gestanden. Schon damals wurde jedoch der HHV-Anlage eine zweite, nicht minder wesentliche Aufgabe beigemessen. So soll mit der HHV-Turbomaschine der Nachweis ihrer Funktionstüchtigkeit und Betriebssicherheit erbracht werden und damit die Demonstration der Anwendbarkeit bekannter Technologien aus dem Gasturbinenbau auf den Bau von Heliumturbinen großer Leistung erfolgen. Mit der gewählten Kombination von Turbine und Verdichter auf einer Welle hat die HHV-Turbomaschine Abmessungen, die denen einer Heliumturbine mit einer Leistungsgröße von ca. 300 MW entsprechen.

Mit der elektromotorisch angetriebenen Turbomaschine können im HHV-Kreislauf die von den Versuchsaufgaben vorgegebenen Bedingungen in einem wirtschaftlich noch vertretbaren Rahmen erfüllt werden. Selbstverständlich sollte an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, daß durch den Einsatz eines in thermischer Hinsicht erstmalig so hoch belasteten Verdichters teilweise auch zusätzliche Probleme während der Abwicklung, etwa durch die Fertigung der Verdichterbeschaufelung, aufgetreten sind, die als nicht unbedingt typisch für eine Heliumturbine anzusprechen sind.

Durch die gleichzeitige Einbindung der Heliumturbinenanlage der Energieversorgung Oberhausen AG (EVO) in das HHT-Entwicklungsprogramm wurde die Möglichkeit geschaffen, die in beiden Anlagen gewinnbaren Erkenntnisse sinnvoll zu ergänzen /5/ /6/.

3. Voraussetzungen und Voruntersuchungen zum Bau der Anlage

Beim Bau der HHV wurde soweit als möglich auf die Technologie des Gasturbinenbaus zurückgegriffen. Trotzdem enthält die Anlage noch eine Vielzahl von Komponenten, die unkonventionell in der Art sind und die deshalb einerseits Voruntersuchungen erforderten, andererseits aber auch als vorrangig untersuchungswürdig im Hinblick auf die HHT-Anlagentechnologie sind. Wenn hier einige wesentliche von den gelaufenen Voruntersuchungen und Vorerprobungen

herausgegriffen werden, dann vorwiegend unter dem Gesichtspunkt ihrer Relevanz für die HTR-Anlagentechnologie.

Mit den Zielvorstellungen einerseits für die Untersuchungen an der Turbomaschine und andererseits für die angestrebten Versuchsbedingungen im Bereich der Teststrecke waren die ungefähren Läufer- und Schaufelkanalabmessungen der Turbomaschine vorgegeben. Damit waren auch im Prinzip die Schaufelabmessungen mit kurzer Schaufelblattlänge in Relation zu den anderen Abmessungen der Schaufeln definiert, wobei die gleichartige Gestaltung der Einzelstufen die Fertigung erleichterte. Um die als Folge des relativ ungewöhnlichen Verhältnisses von Schaufellänge zu Schaufelsehne erwartete Reduktion in der strömungstechnischen Güte etwa durch erhöhte Spaltverluste in den Griff zu bekommen, wurden Modelluntersuchungen an einer Versuchsmaschine durchgeführt. Als Ergebnis dieser Untersuchungen konnte die im Planungsstadium mit neun veranschlagte Zahl der Verdichterschaufelreihen der Turbomaschine auf acht reduziert werden.

Der Einsatz relativ kurzer Schaufeln schaffte für die Frage der Auswahl des Schaufelwerkstoffes insofern eine Lösung, als daß auch ohne den Einsatz einer Schaufelblattkühlung, wie sie in offenen Gasturbinen mit in etwa vergleichbaren Auslegungsdaten zum Einsatz kommt, auszukommen war. Dabei sind die Schaufelblätter für die HHV-Beschaufelung für die volle Gastemperatur ausgelegt. Da der Turbomaschinenrotor jedoch in bewährter Schweißtechnik aus ferritischem Material ausgeführt ist, wurde ein Schaufelfuß-Kühlsystem zur Absenkung der Betriebstemperatur des Rotors und des Leitschaufelträgers auf zulässige Werte erforderlich. Hierzu war die Entwicklung eines neuen Abdichtsystems, auf das noch nachfolgend eingegangen wird, notwendig. Sorgfältige Untersuchungen während der Montage der Beschaufelung wurden zur Kontrolle der partiellen Dichtigkeit dieses Abdichtsystems mit Erfolg durchgeführt.

Im Zusammenhang mit der Werkstoffauswahl für die Beschaufelung erfolgte schon sehr frühzeitig die Überlegung zum Einsatz von TZM, einer Molybdän-Legierung mit Zusätzen von Titan und Zirkon, die höhere Langzeitfestigkeitswerte bei Temperaturen oberhalb von 850°C als alle vergleichbaren üblichen Schaufelwerkstoffe aufweist. Dabei war der Grundgedanke, derartige Schaufeln in der HHV erstmalig zu Probezwecken zu verwenden. Zunächst erfolgte dieser Einsatz zwar noch nicht, da die erste Beschaufelung komplett aus dem Werk-

stoff Nimocast 713 LC gefertigt und eingebaut wurde. Voruntersuchungen haben jedoch für lichtbogenerschmolzenes TZM mit nachfolgender Formgebung durch einen Schmiedevorgang durchaus ermutigende Ergebnisse, auch hinsichtlich der Zähigkeitswerte bei niederen Temperaturen, gezeigt. Um das Einsatzrisiko in der HHV für derartige Schaufeln noch weiter zu reduzieren, sollen in Ergänzung zu durchgeführten Ausreißversuchen mit positiven Aussagen noch Schleuderversuche an nachgebildeten Schaufelkörpern stattfinden.

Aus dem Bereich der Materialuntersuchungen sind für den Einsatz in der HHV auch die umfangreichen Voruntersuchungen zum Materialpaarungsverhalten und Reibpaarungsverhalten bei erhöhten Temperaturen zu nennen. Ausgedehnte und detaillierte Versuchsreihen wiesen den Weg zu Materialpaarungen bzw. zu Beschichtungsverfahren für aufeinander gleitende Materialoberflächen, um Kaltverschweißungen in Reinsthelium bei erhöhten Temperaturen zu vermeiden. Untersucht wurden dabei sowohl Beschichtungswerkstoffe als auch der Einfluß unterschiedlicher Beschichtungsverfahren zur Aufbringung der Verschleißschichten. Ferner wurde bei diesen Voruntersuchungen auch das für die Konstruktion der beschichteten Teile maßgebende Grundmaterial variiert. Ergebnisse, die ein Kaltverschweißen an lösbaren kraftschlüssigen Verbindungen ausschließen sollten, wurden ermittelt für die Beschichtungswerkstoffe Chrom-Carbid und Zirkonoxyd, aufgebracht sowohl im Plasmasprayverfahren als im Detonationsbeschichtungsverfahren. Da auch der wesentlich unkomplizierter durchzuführende Auftrag von Bornitrid-Pulver Verbesserungen der Gleiteigenschaften aufeinander geriebener Probestücke erbrachte, wurde diese Vorsorge gegen Kaltverschweißungen an weniger kritischen Stellen, wie z.B. dem Innenliner der Heißgasleitung, durchgeführt.

Bei der Beschreibung des Wellendichtungssystems für die Turbomaschine wurde bereits auf die Untersuchungen am BBC-Wellendichtungsprüfstand eingegangen /7/. Bei diesen Vorerprobungen der Wellendichtung zeigte sich die Beherrschbarkeit der gestellten Anforderungen durch das gewählte Schwimmringprinzip mit drei Ölkreisläufen.

Umfangreich waren die Voruntersuchungen in Blickrichtung auf die HHV-Heißgasleitung /8/ /9/ /11/. Neben der Isolierung erfolgten Voruntersuchungen am eingesetzten Teilefänger, die insbesondere der Ermittlung eines Einsatzes mit minimalen Druckverlusten galten. Auch für die zur Regelung des Heißgasstromes erforderlichen Regelklappen mußten Sonderentwicklungen betrieben

werden. Dies führte dazu, daß die beweglichen Klappeninnenteile auftragsmäßig vom Klappengehäuse mit Innenauskleidung und Innenliner getrennt wurden, um so das vorhandene "know how" verschiedener Herstellerfirmen optimal für die Ausführung dieser Klappen zu nutzen.

4. Beschreibung der Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage

4.1 Kreislaufschema und Anlagenanordnung

Die HHV-Anlage arbeitet im geschlossenen Kreislauf entsprechend Abb. 2.

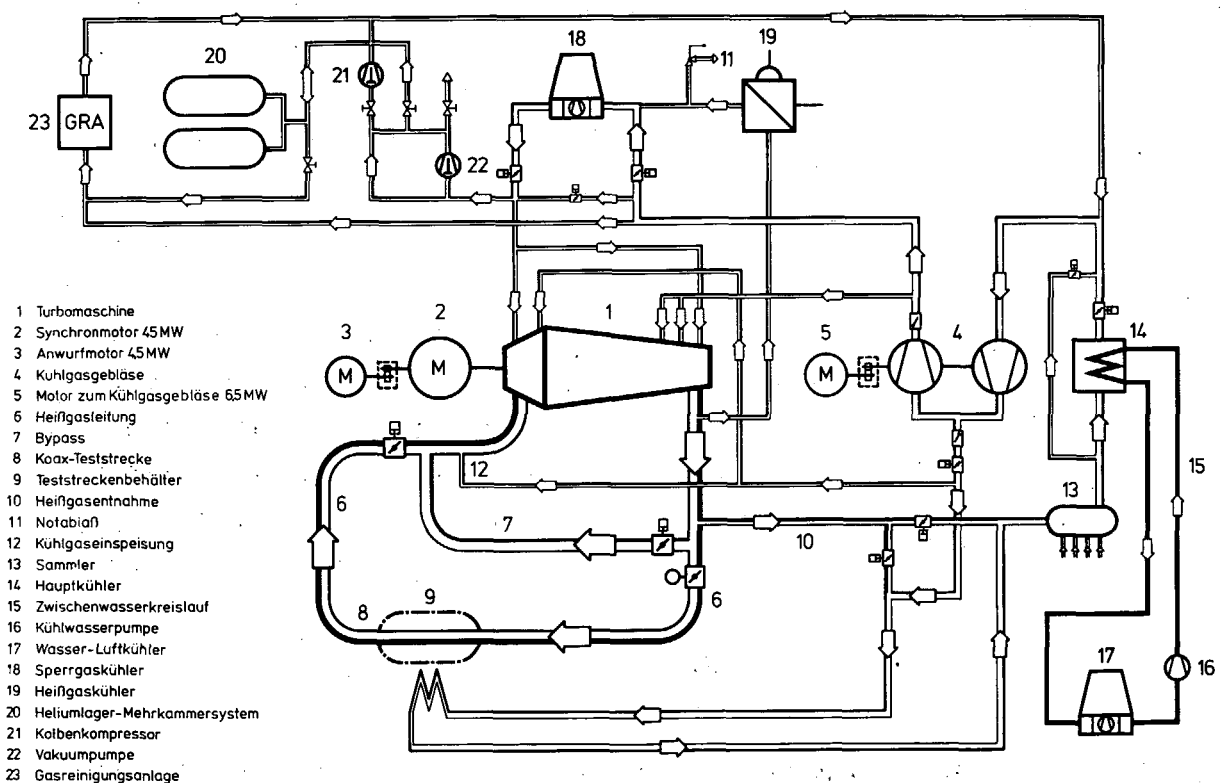


Abb. 2 Schema der Gesamtanlage

Das Helium wird von der elektromotorisch angetriebenen Turbomaschine im Heißgasleitungssystem umgewälzt. Der Antrieb der Maschine erfolgt über einen Synchronmotor bei 3000 min^{-1} . Die Turbomaschine hat einen 2-stufigen Turbinenteil, gefolgt von einem 8-stufigen Verdichterteil. Die Energie-

wandlung im Turbinenteil trägt mit einem Anteil von ca. 45 MW zum Leistungsbedarf der nachfolgenden Verdichtung mit ca. 90 MW im Auslegungspunkt bei. So ist durch den Antrieb nur das Defizit von zusätzlich ca. 45 MW abzudecken. Mit der höchsten Kreislauftemperatur verläßt das Heißgas am Verdichterstutzen die Turbomaschine und strömt in die Heißgasleitung ein. Über die ca. 67 m lange, aus einzelnen Elementen zusammengesetzte Heißgasleitung strömt das Gas zurück zum Turbinenstutzen der Turbomaschine. Regelklappen in dem Heißgasleitungssystem und in der vorhandenen Bypass-Leitung geben die Möglichkeit, einen Teil des Heliumstromes über die Bypass-Leitung zu führen. Damit kann der Massenstrom durch die Teststrecke innerhalb der durch die Turbomaschine vorgegebenen Grenzen beliebig variiert werden und die Turbomaschine kann vor einem Fahren im instabilen Betriebsbereich geschützt werden.

Die Heißgasleitung ist so aufgebaut, daß ein Teststreckenbehälter untergebracht werden kann. Da bei dem System die übliche Wärmesenke des geschlossenen Gasturbinenkreislaufes fehlt, wird das Gleichgewicht zwischen der Wärmezufuhr und -abfuhr durch einen parallel zum Versuchskreislauf geschalteten regelbaren Kühlkreislauf eingestellt. Über diesen Kühlkreislauf wird eine Teilgasmenge aus der Heißgasleitung entnommen und nach dem Mischen mit Kühl- und Sperrgas und der eigentlichen Abkühlung im Hauptkühler vom Kühlgasgebläse verdichtet. Dieses 4-stufige Radialgebläse liefert die Kühl- und Sperrgasversorgung für die Maschine und die Gesamtanlage. Ein Teilstrom des Kühlgases wird nach der zweiten Stufe des Kühlgasgebläses entnommen und teilweise in die Heißgasleitung vor dem Wiedereintritt am Turbinenstutzen der Turbomaschine geführt. Die hauptsächliche Wärmeauskopplung aus dem System erfolgt im Hauptgaskühler. Über ein geschlossenes Kühlsystem erfolgt von dort aus die Wärmeabgabe über einen Wasser-Luftkühler (Trockenkühler). Neben diesem Kühlsystem beinhaltet die Anlage noch einen Sperrgaskühler zur Abkühlung des in die Maschine im Bereich der Lagerung mit ca. 50°C eingeführten Sperrgases. Für verschiedene Kühlungen auf niederem Temperaturniveau, wie z.B. Ölkühler, erfolgt die Wärmeauskopplung in einem im Schema nicht gezeigten Kühlturm. Schematisch dargestellt ist dagegen die mögliche Kühlung des Heißgases, die für eine schnelle Druckabsenkung im Kreislauf bei Störfällen unter Wiederabspeicherung des ausströmenden Heliums zum Einsatz kommt. Das Gasversorgungs- und Gasreinigungssystem stellen die restlichen auf dem Schema ersichtlichen Elemente des Kreislaufs dar.

In Abb. 3 ist die Lage der HHV-Anlage mit Gebäude, Nebenanlagen und Außenanlagen zu sehen. Die Anlage befindet sich am Ostrand der KFA in unmittelbarer Nachbarschaft der Laborgebäude der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH und des Versuchsreaktors der AVR.

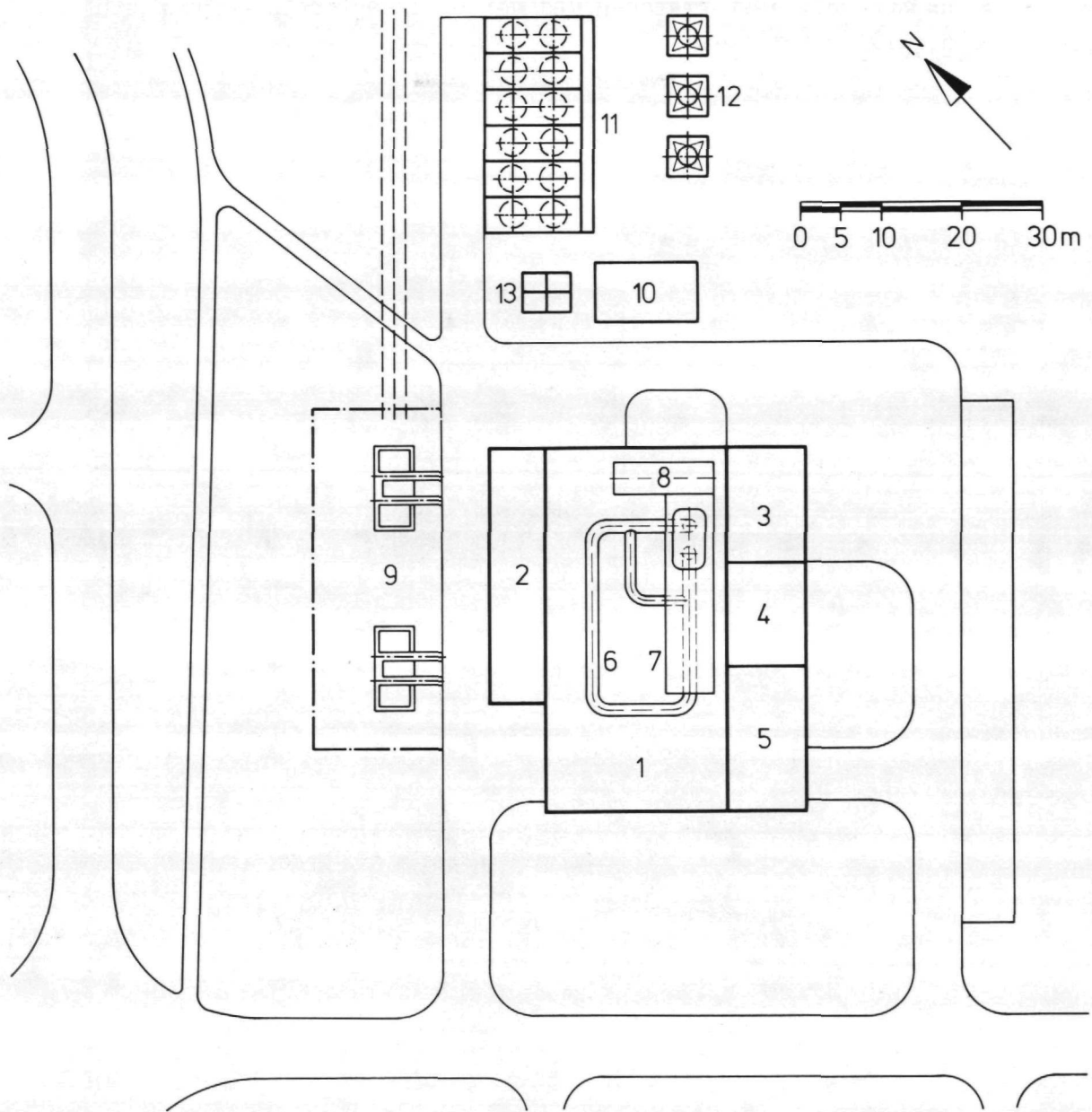


Abb. 3 Lageplan für die HHV-Anlage mit:

- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1 HHV-Halle | 7 Turbomaschinentisch |
| 2 E-Anbau | 8 Kühlgasgebläsetisch |
| 3 Heliumlager | 9 Hochspannungsversorgung |
| 4 Heliumreinigungs-
anlage | 10 Pumpenhaus |
| 5 Montageplatz | 11 Luft-Wasser-Kühler |
| 6 Heißgasleitung | 12 Kühltürme |
| | 13 Sperrgaskühler |

Abb. 4 zeigt eine Außenaufnahme des Gebäudes mit vorgelagerten Versorgungseinrichtungen während der Bauzeit. Zu erkennen sind auf der linken Seite des Bildes die Kühlerzellen des geschlossenen Rückkühlsystems. Vor dem fensterlosen Hallenbau steht der sogenannte E-Anbau, in dem sich oben der Warterraum befindet. Auch die 110-kV-Stromversorgung für die HHV-Anlage mit den beiden Hochspannungstransformatoren und den erforderlichen Abspanngerüsten zeigt das Bild.

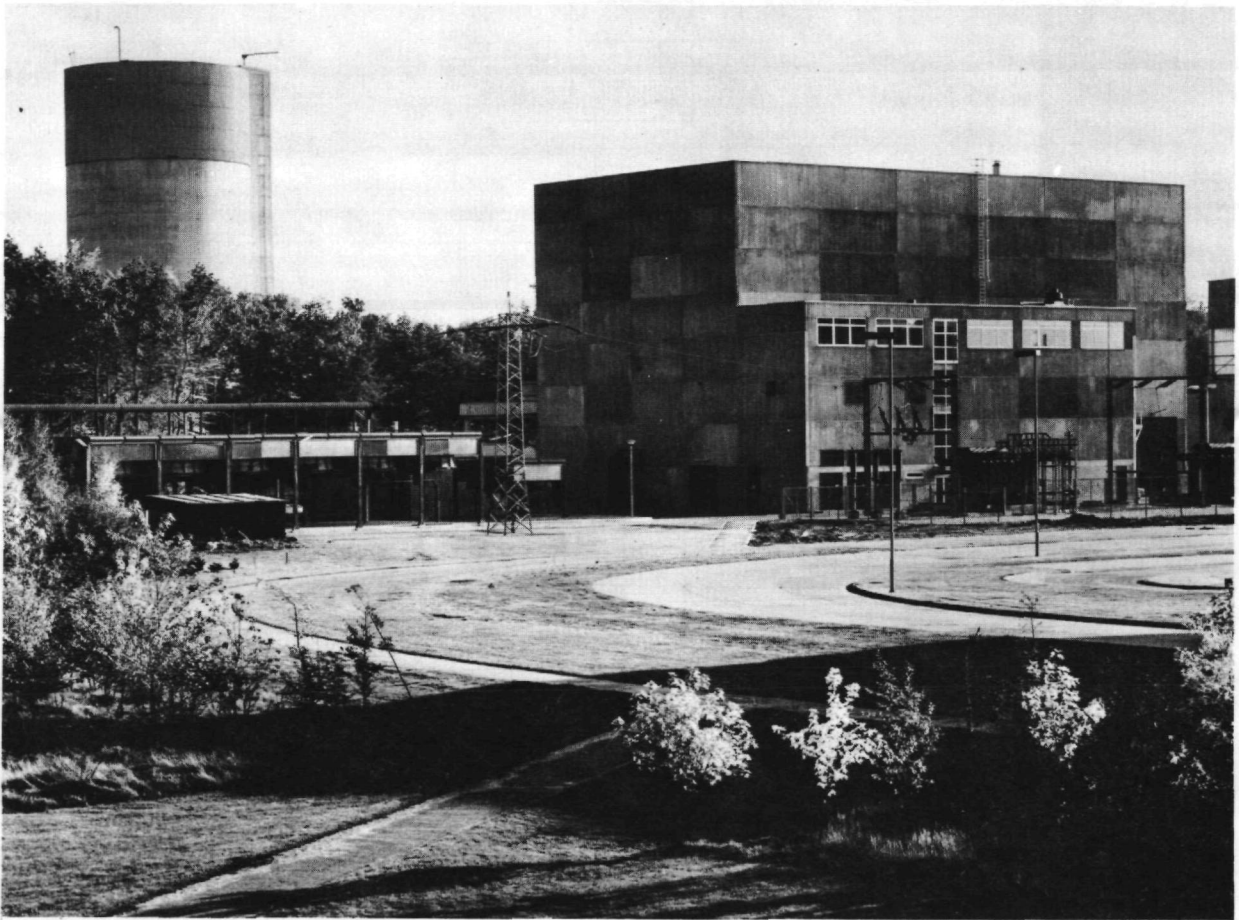


Abb. 4 Außenansicht der HHV-Anlage

In der Tabelle 1 sind die wesentlichsten Auslegungsdaten des Gaskreislaufs enthalten. Dabei handelt es sich um Werte für den Auslegungspunkt der Anlage, dies bedeutet eine Gastemperatur von 850°C am Austritt der Turbomaschine bei einem Druck von 51,2 bar. Neben den Gasdaten für das Heißgassystem wurden in diese Tabelle auch die wesentlichsten Daten des Kühl- und Sperrgassystems aufgenommen.

Tabelle 1: Wesentliche Daten für den Gaskreislauf (im Auslegungspunkt)

Kreislaufstelle	Temperatur °C	Druck bar	Massenstrom kg/s
TM am Verdichteraustritt	850	51,2	212
Heißgasentnahme aus HGL	850	51,2	11,4
Teststrecke	850	51,2	(bis) 201
Kaltgaszugabe in HGL	250	51,5	8,4
TM am Turbineneintritt	826	49,7	209
Vor Hauptkühler	390	49,5	53,5
Eintritt Kühlgasgebläse	236	49	56,8
Zwischenentnahme Kühlgasgebläse	250	51,8	36
Endstufe Kühlgasgebläse	258	53,5	20,8
Kühlgas für Koaxleitung	300	51,2	22,9
Sperrgaskühler Eintritt	258	53	2,3
Sperrgaskühler Austritt	50	52,75	2,3
Heliumreinigungsanlage (Eintritt)	258	52,6	0,05

TM = Turbomaschine

HGL = Heißgasleitung

In Abb. 5 ist ein Foto des für die Rohrleitungsverlegung der Anlage im Maßstab 1:15 hergestellten Modells zu sehen. Die Turbomaschine mit Antriebsmotor und Anwurfmotor ist in der Mitte des Bildes zu erkennen. Unterhalb des Turbomaschinentisches ist die Heißgasleitung an die Maschine angeschlossen. Auf der linken Seite des Bildes ist der Kühlgaskreislauf mit den hauptsächlichen Elementen Hauptgaskühler sowie Kühlgasgebläse mit Antriebsmotor und Getriebe angeordnet.

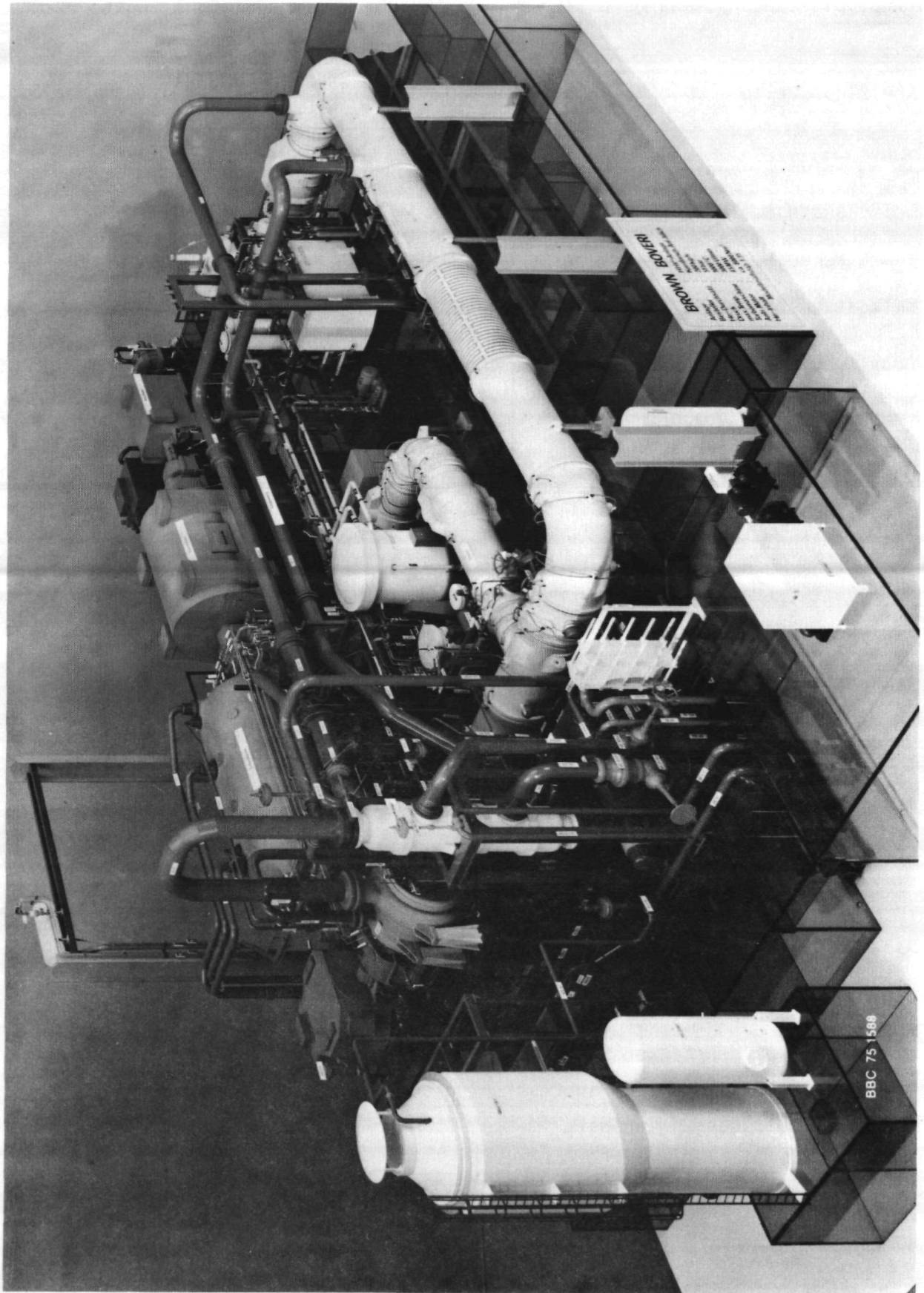


Abb. 5 Modell der Anlage

BBC 75 1566

In der Abbildung 6 ist eine Ansicht der HHV-Anlage mit Montagestand Ende 1976 wiedergegeben.

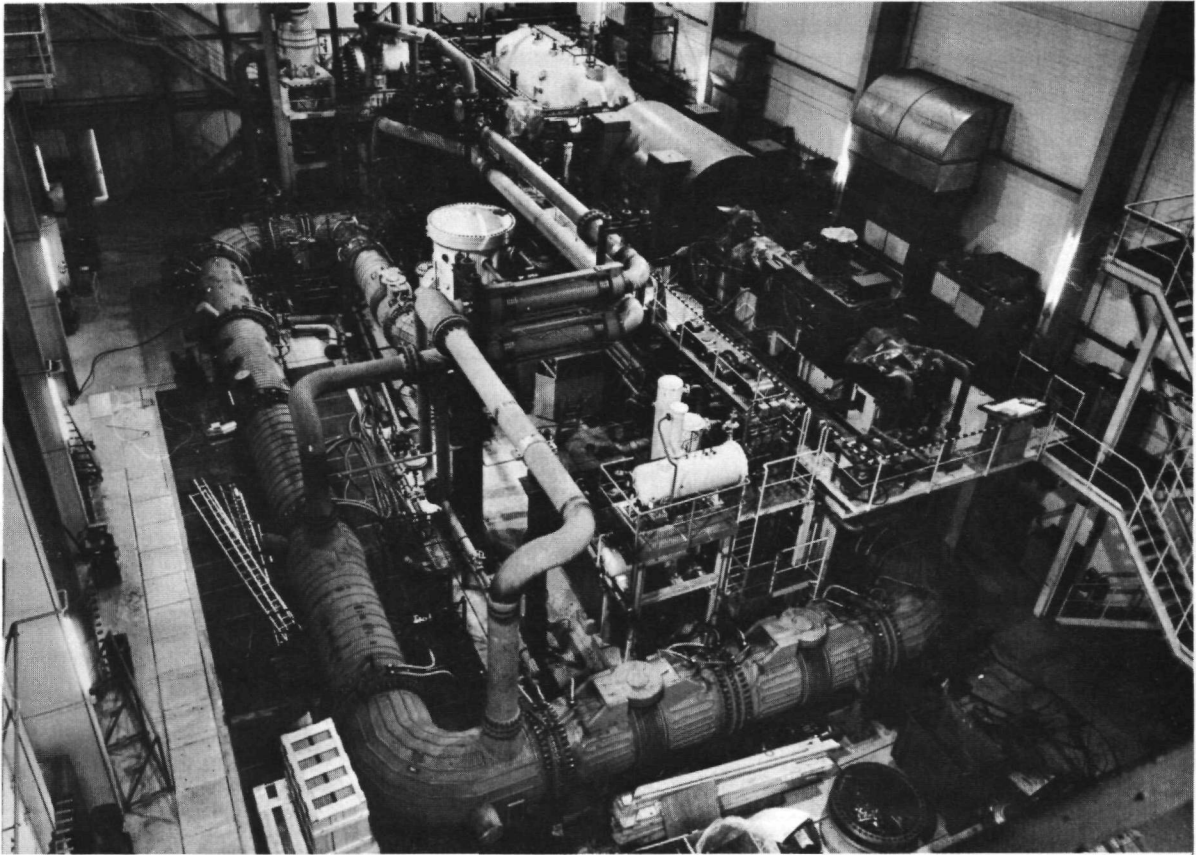


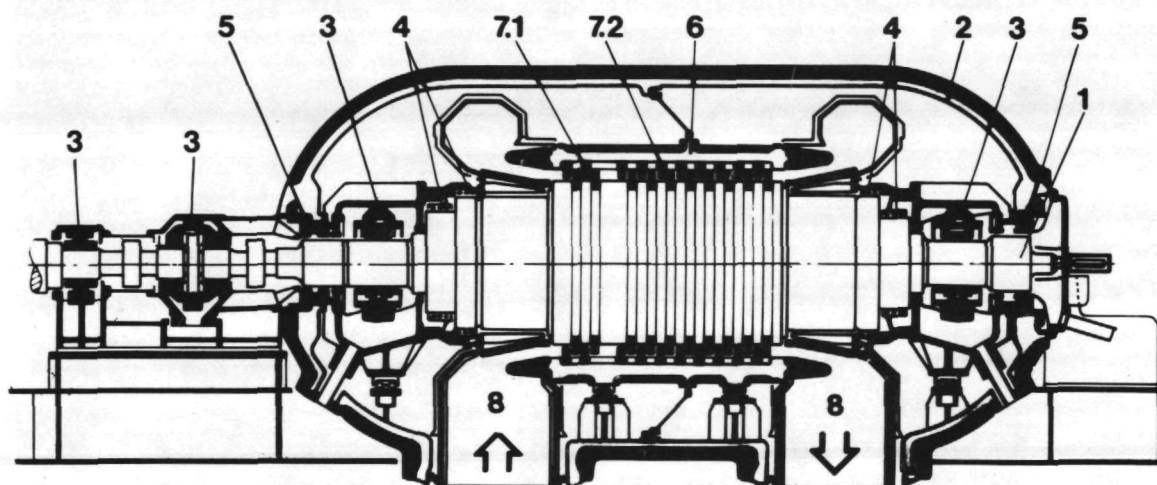
Abb. 6 Blick auf die Gesamtanlage
Montagestand Ende 1976

4.2 Beschreibung der Einzelkomponenten

4.2.1 Turbomaschine

Art und Schaltung der Turbomaschine bestimmen, wie bereits erläutert, die Auslegung des gesamten Kreislaufs. Mit der Turbomaschine wird das Gas im Kreislauf umgewälzt und die für die Experimentiervorhaben erforderliche Druckdifferenz erzeugt. Die bei der Verdichtung des Gases aus der Antriebsarbeit frei werdende Dissipationsenergie bringt die Aufheizung des Heliums. Turbine und Verdichter, die auf der Welle direkt hintereinander folgen,

sind Strömungsmaschinen axialer Bauart. Die Abbildung 7 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Maschine.



- | | |
|-----------------------|-------------------------------------|
| 1 Läufer | 6 Leitschaufelträger |
| 2 Gehäuse | 7 Beschaufelung |
| 3 Lager | 7.1 Turbinenteil |
| 4 Labyrinthdichtungen | 7.2 Verdichterteil |
| 5 Wellendichtung | 8 Anschlußstutzen
Heißgasleitung |

Abb. 7 Schnitt durch die HHV-Turbomaschine

Das Helium strömt durch den antriebsseitigen Gasstutzen in den Turbinenteil der Maschine. Nach dem Austritt aus dem Verdichter strömt das Gas durch den Austrittsdiffusor in den Gasstutzen und von dort zurück in die Heißgasleitung. Vom Heißgas beaufschlagt werden innerhalb der Maschine die Gasstutzen einschließlich der Diffusorpartien und der Schaufelkanal. Alle anderen Partien der Maschine sind durch ein Kühl- und Sperrgassystem gegen eine zu hohe thermische Beanspruchung geschützt. Der prinzipielle Aufbau dieses Kühl- und Sperrgassystems ist aus Abb. 8 ersichtlich.

Der rund 60 Mp schwere Rotor für eine Drehzahl von 3000 min^{-1} weist bei einer Länge von ca. 8 m einen Lagerabstand von ca. 5,7 m auf. Der Schaufelkanal hat einen Innendurchmesser von 1,6 und einen Außendurchmesser von 1,8 m bei einer Gesamtlänge von ca. 2,3 m.

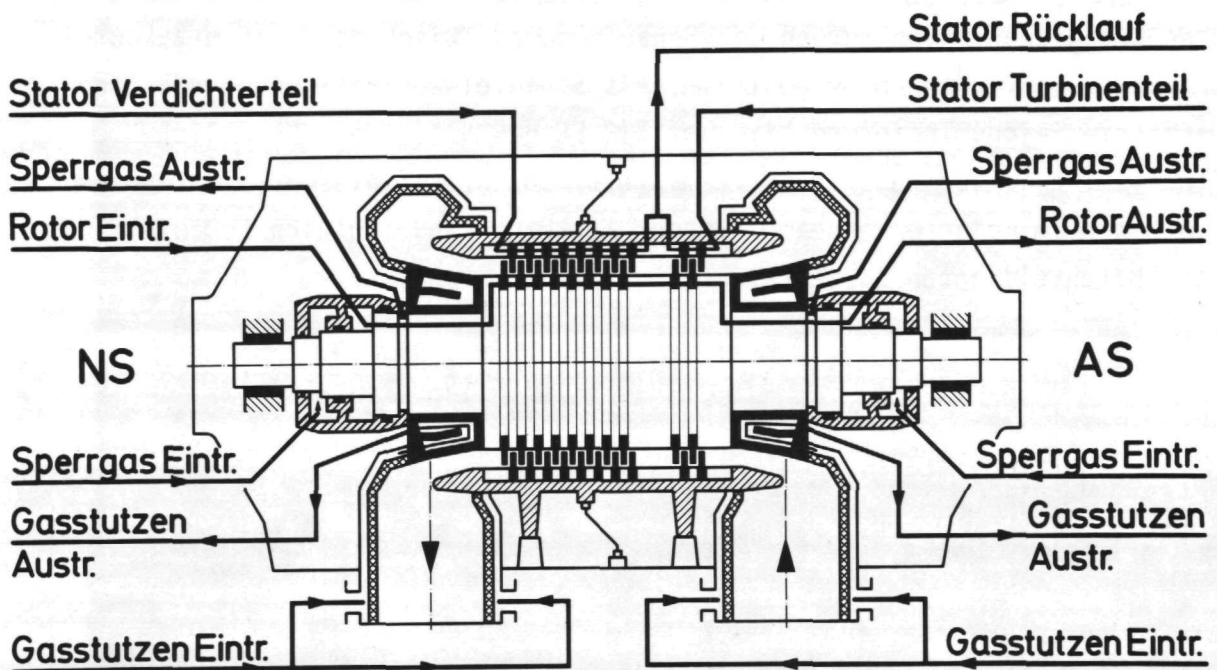


Abb. 8 Kühl- und Sperrgasverlauf in der Turbomaschine

Der Rotor ist in der bei BBC bewährten Schweißtechnik aus einzelnen Schmiedestücken aus warmfestem ferritischem Material hergestellt. In den Rotor sind Längsnuten zur Aufnahme der Beschauelung gefräst. Der Turbinenteil hat 2 Schaufelreihen mit jeweils 84 Laufschaufeln und 90 Leitschaufeln, während der Verdichterteil 8 Reihen mit jeweils 56 Laufschaufeln und 72 Leitschaufeln aufweist. Alle Schaufeln sind fußgekühlt, d.h., Kühlgas wird durch die Schaufelfüße und die Zwischenstücke in besonderen Kühlkanälen geführt. Auf Abb. 8 ist der prinzipielle Kühlgasverlauf durch den Rotor zu erkennen. Das Kühlgas wird mit ca. 260°C auf der Verdichterseite über einen Ringkanal in den Rotor eingeführt und strömt durch Bohrungen im Labyrinthbereich des Rotors, ehe es der eigentlichen Kühlgasführung in der Beschauelung zugeführt wird, die in den Schaufelfüßen und Zwischenstücken durch Bohrungen erfolgt. Die für die Wirksamkeit der Kühlung sehr wesentliche Abdichtung an den jeweiligen Übergängen erfolgt durch ein speziell entwickeltes Dichtungssystem auf der Basis von Dichthülsen mit Kolbenringen. Nach Durchströmen des Verdichterteiles wird das Kühlgas durch Übergangsstücke geführt, in denen die Kühlkanäle im Verhältnis 2:3 entsprechend den unterschiedlichen Laufschaufelzahlen im Verdichter- und Turbinenteil aufgeteilt werden. Die Rückführung des gemessenen Kühlgasstromes auf der Tur-

binenseite erfolgt ähnlich wie die Kühlgaszufuhr. Aufgrund der erforderlichen Kühlgasbohrungen wurden die Schaufeln und Zwischenstücke im Vakuumpräzisionsgußverfahren hergestellt. Als Schaufelwerkstoff wurde die hochwarmfeste Feingußlegierung Nimocast 713 LC gewählt. Einen Überblick über Einzelteile der Beschaukelung vermittelt Abb. 9. Auf diesem Bild sind auch die Nuten im Rotor erkennbar. Auf der Werkbank sind einzelne Schaufeln mit den Abdichtelementen zu sehen.

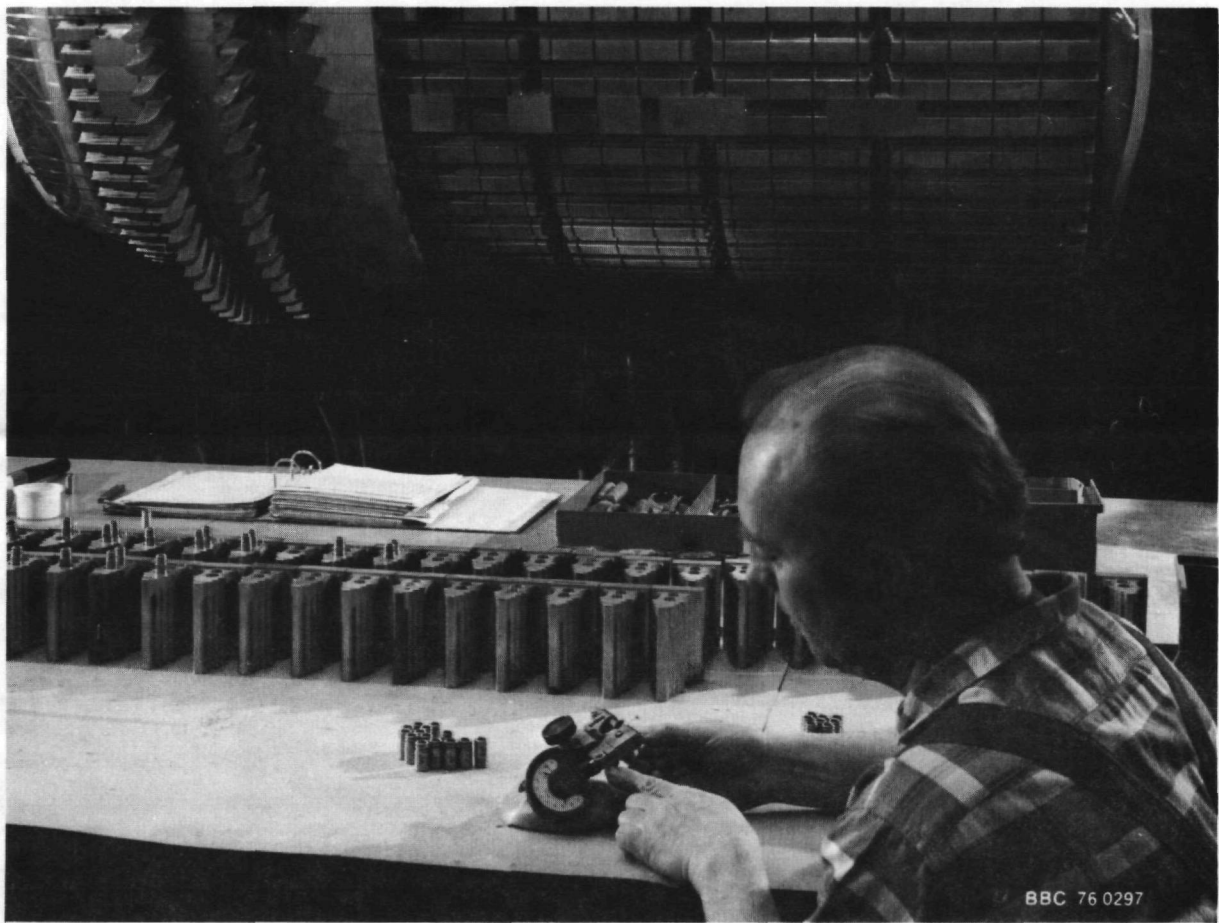


Abb. 9 Beschaukelung des Rotors während der Montage

Der Leitschaufelträger aus warmfestem ferritischem Stahlguß wird horizontal und vertikal über im Gehäuse eingehängte Keilführungen in seiner Lage gehalten. Er weist eine horizontale Trennfuge auf. Auch der Leitschaufelträger ist axial genutet, allerdings nicht mit einem Tannenbaumprofil wie der Läufer, sondern mit einem Hammerkopffprofil. Auf die Anzahl der den jeweiligen Laufschaufeln vorgelagerten Leitschaufeln wurde bereits eingegangen. Die Kühlgasführung im Leitschaufelteil erfolgt ähnlich wie im

Rotorteil, d.h., auch hier erfolgt eine Schaufelfußkühlung. Hinsichtlich der Kühlgasführung wird auf die Abb. 8 verwiesen. Das Kühlgas tritt über Verteilungsrohre beidseitig in den Leitschaufelträger ein und durchströmt die Schaufelfußpartien in axialer Richtung. Der gemeinsame Austritt des Kühlgasstromes erfolgt zwischen dem Verdichter- und Turbinenteil. An den geteilten und verschraubten Leitschaufelträger angeflanscht sind die Diffusorelemente, die in den Heißgasraum hineinragen. Diese Elemente weisen eine Innenisolierung aus "Kaowool", einem keramischen Fasermaterial, auf und erreichen die Heißgastemperatur.

Die Gasstutzen zur Führung des Heißgasstromes sind in der Trennfuge getrennt. Für die Ausführung der Gasstutzen wurde eine Konstruktion gewählt mit einem den Heißgasstrom führenden Innenliner, der von einem Isolationsraum umschlossen wird. Die Isolierung aus "Kaowool"-Matten wird auf den Außenliner des Gasstutzens aufgebracht und durch Deckplatten gehalten. Der Außenliner ist gasgekühlt und mit einem Gasführungsgehäuse für den Kühlgasstrom ausgestattet. Wie auf Abb. 8 im Prinzip erkennbar, tritt das Gas an den Gasstutzen ein, und zwar einmal an den unteren Gasstutzen im Bereich der Heißgasanschlüsse und zum anderen dort, wo die Gasstutzengehäuse an den Leitschaufelträger anschließen. In diesem Bereich strömt Kühlgas aus dem Außenraum der Maschine in die Kühlgasführung um die Gasstutzen. Die Absaugung erfolgt über die innere Stopfbuchspartie, welche so gekühlt wird, bevor der Gasstrom über Sammelleitungen wieder nach außen geführt wird. Die mit Heißgas beaufschlagten Gasstutzen sind einerseits gegen den Leitschaufelträger (Abb. 10) und andererseits gegen das Stopfbuchsengehäuse durch umlaufende Labyrinthdichtungen abgedichtet. Die innere Stopfbuchse trägt auf der Heißgasseite Abdeckbleche, ebenfalls aus dem Werkstoff Nimocast 713 LC. Hinter diesen befindet sich eine Isolierung aus "Kaowool" zum Stopfbuchsengehäuse hin, durch das zur Kühlung Stutzenkühlgas strömt.

Der Stopfbuchsbereich wird beidseitig durch 2 Stopfbuchsen, jeweils eine innere und äußere, gebildet. Auf Abb. 7 sind diese, als Pos. 4 gekennzeichnet, sichtbar. Zusätzlich gibt es noch eine Abtrennung zum Lagerraum hin. Zwischen dieser Abtrennung und der äußeren Stopfbuchse wird Sperrgas mit 50°C zugeführt (Abb. 8). Dieses kühlt auch den Lagerbereich. Ein Teil des Gases tritt in den Lagerbereich und verläßt diesen zusammen mit dem Heliumöl für die Lagerschmierung. Ein anderer Teil strömt in den Bereich zwischen äußerer und innerer Stopfbuchse. Dort erfolgt eine Vermischung mit dem

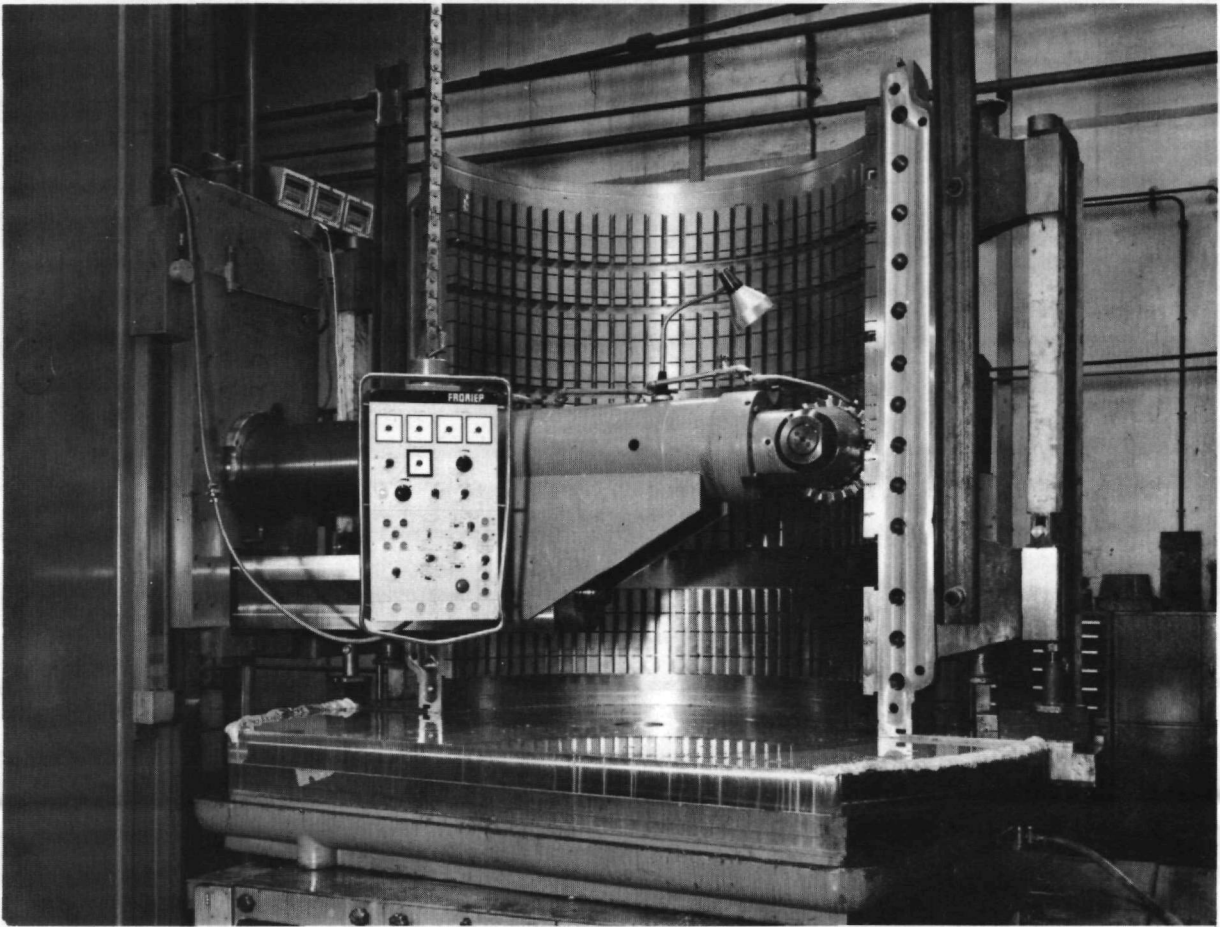


Abb. 10 Leitschaufelträger bei der Bearbeitung

Rotorkühlgasstrom. Die innere Stopfbuchse ist wesentlich länger als die äußere ausgeführt, da hier der Temperatenausgleich zwischen Heiß- und Kühlgas erfolgt, und hat eine Sperrgasabsaugung. Schematisch dargestellt sind die Kühl- und Sperrgasverläufe in diesem Bereich ebenfalls in Abb. 8. Die Absperrung zwischen Heißgaskanal und Absaugung der inneren Stopfbuchse erfolgt durch Dichtungstreifen auf der Welle. Nach außen hin schließen sich im Stopfbuchsgehäuse untergebrachte Labyrinthdichtelemente an, die auch für die äußere Stopfbuchse und die Trennung zum Lagerraum eingesetzt sind.

Der Rotor wird in 2 Segmenttraglagern mit Öldurchflußschmierung gelagert. Das Kammlager ist außerhalb zwischen Turbomaschine und Synchronmotor angeordnet, wie dies aus Abb. 7 erkennbar ist. Die Zwischenwelle mit dem Kammlager ist einseitig starr an die Turbomaschine und auf der anderen Seite an den Synchronmotor gekuppelt. Für den Wellenstrang stellt das Kammlager

den Fixpunkt dar, während der Fixpunkt des Gehäuses in Höhe des Verdichter-
austrittsstutzens liegt. Die Traglager in der Maschine werden mit Helium-
Lageröl versorgt. An dieser Stelle tritt der höchste Systemdruck mit ca.
56 bar auf. Das Kammlager wird wie die übrigen Lager des Antriebsstranges
in üblicher Weise aus dem Luftölsystem geschmiert. Die Lager in der Maschine
stützen sich über die Lagergehäuse am Außengehäuse ab.

Für das Außengehäuse wurde eine Gußkonstruktion gewählt. Zunächst wurde auch
eine Schweißkonstruktion in den Auswahlprozeß mit einbezogen. Aus Gründen
der Dichtigkeitserprobung und der Kosten fiel die Entscheidung zugunsten
der Stahlgußkonstruktion. So konnte eine festigkeitsmäßig und fertigungs-
technisch günstige Auslegung erzielt werden. Dabei ist das Gehäuse als
größte Stahlgußkonstruktion ihrer Art in Abmessungen und Auslegungsdruck
neuartig. Das Gehäuse ist durch einen Horizontalflansch geteilt. Die Ausbil-
dung der Gehäuseflansche in der Trennfuge entspricht den Dichtheitsanforde-
rungen an die Gesamtanlage, wobei die beiden Gehäusehälften über den Trenn-
fugenflansch durch Dehnschrauben verbunden werden. Die Dichtung in der
Flansch-Dichtleiste erfolgt durch eine Metallpaste auf Kupferbasis.

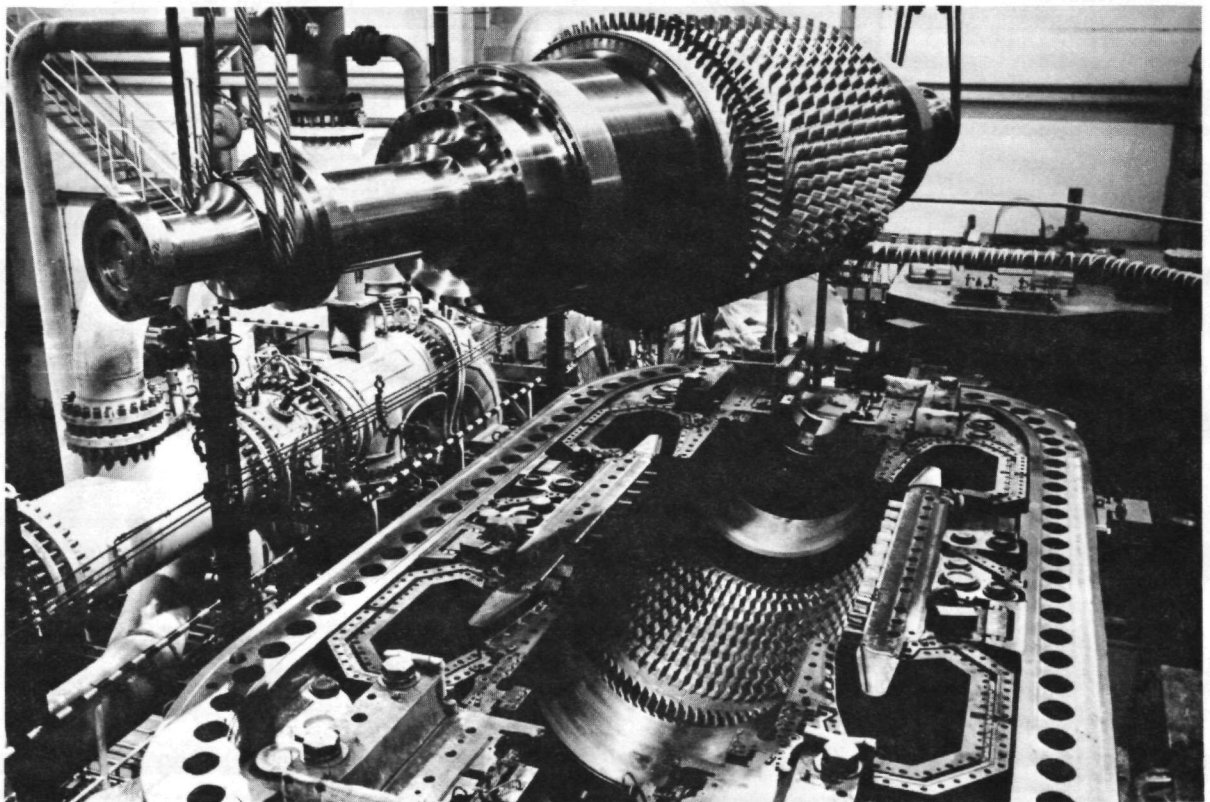


Abb. 11 Turbomaschine bei der Montage

Wie auf Abb. 11 erkennbar ist, befindet sich zwischen der inneren Dichtleiste des Gehäuses und den Löchern für die Flanschverschraubung ein umlaufender Kanal, über den etwaige Heliumleckagen festgestellt und gezielt abgesaugt werden können. Insofern sind mögliche Gasverluste an dieser Stelle kontrollierbar und würden in den Kreislauf über einen Membrankompressor zurückgeführt. Der gesamte Innenraum des Gehäuses wird durch Kühlgas mit einem Temperaturniveau zwischen ca. 250 und 260°C beaufschlagt. Eine auf Abb. 7 erkennbare Trennwand zwischen dem Verdichter- und dem Turbinenteil teilt den äußeren Kühlgasraum. Diese Trennung ist aufgrund der Druckunterschiede erforderlich, da der Differenzdruck zwischen Heißgasraum und Kühlgasseite nicht zu groß sein darf. Im Betrieb wird das Gehäuse eine Temperatur von ca. 250°C erreichen. Aus diesem Grunde wird eine Spritzasbestisolation am Außengehäuse angebracht.

Bei Betrieb der Anlage wird der Wellendurchtritt durch das Gehäuse mit dem aus dem Bau wasserstoffgekühlter Generatoren bekannten Dreikanaldichtungssystem nach dem Schwimmringprinzip abgedichtet. Für den Stillstand wird eine gesonderte Wellendichtung eingesetzt. Da die Abmessungen und Betriebsverhältnisse für die in der HHV eingesetzten Wellendichtungen neuartig sind, waren besondere Voruntersuchungen an einem Wellendichtungsprüfstand erforderlich. Ergebnisse dieser Untersuchungen, die im einzelnen in /7/ dargelegt sind, bestätigten die Eignung dieses Wellendichtungssystems unter Helium. Bei der HHV-Turbomaschine wird dieses Wellendichtungssystem dann erstmalig an einer ausgeführten Maschine erprobt. Die Abmessungen der Wellendichtung mit 560 mm Ø auf der Nichtantriebsseite sind auch repräsentativ für größere Maschinen bis in den Leistungsbereich von ca. 600 MW. Das Schema der Wellendichtung ist aus Abb. 12 ersichtlich. Das rechts angeordnete Traglager befindet sich in der Maschine und wird mit Heliumlageröl versorgt. Die Wellendichtung muß ein Entweichen des Heliums am Wellendurchtritt verhindern. Zu diesem Zweck sind 3 Schwimmringe angeordnet, die mit Heliumsperröl, Vakuumperröl und Luftsperröl beaufschlagt werden. Das Heliumsperröl und das Luftsperröl werden mit ca. 0,8 bar Überdruck gegenüber dem Gasdruck den Schwimmringen zugeführt, während das Vakuumperröl mit ca. 1 bar Überdruck gegenüber dem Gasdruck den höchsten Druck aufweist. Damit ist gewährleistet, daß das Vakuumperröl den Heliumsperrölkreislauf vom Luftsperrölkreislauf abtrennt. Das unter Vakuum entgaste Öl wird in den Vakuumperrölring gepresst und strömt teilweise mit dem Heliumsperröl innen und teilweise mit dem Luftsperröl außen ab. Ein Eindringen von Luft in das Heliumölsystem und damit

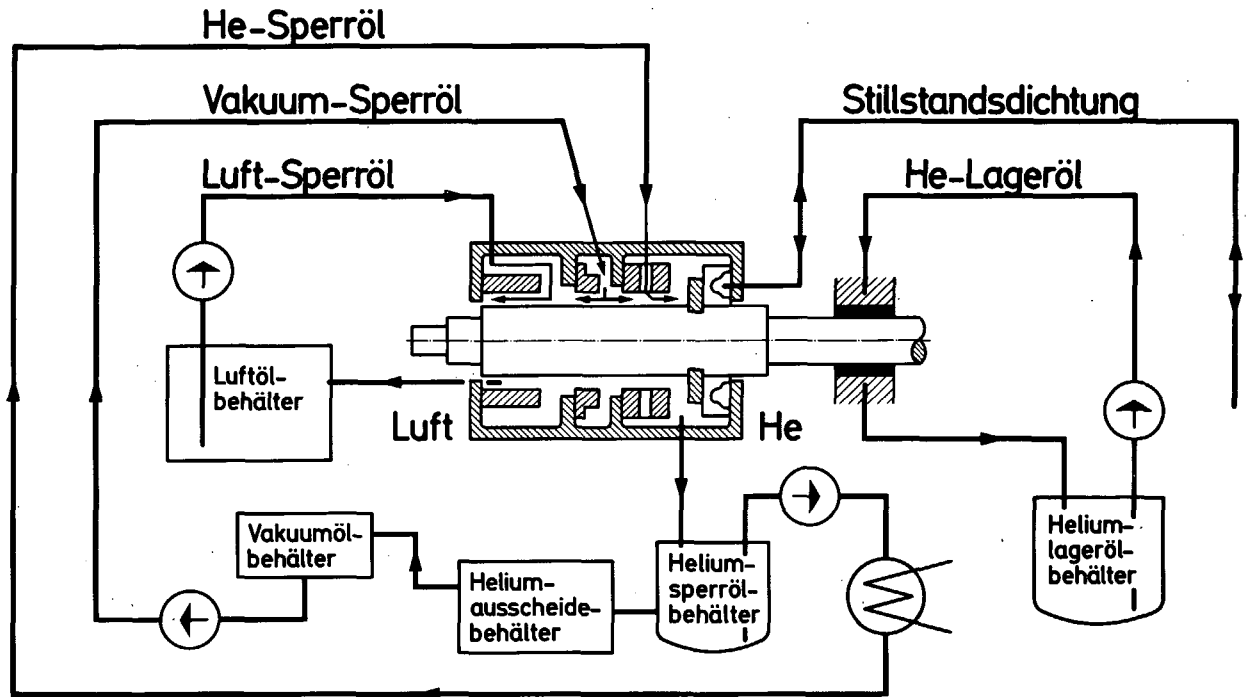


Abb. 12 Schema der Wellendichtung mit Ölversorgung für die Turbomaschine

zwangsläufig auch in das Heliumgassystem kann auf diese Weise verhindert werden. Der eigentliche Druckabbau vom Systemdruck auf den Umgebungsdruck erfolgt über den aus diesem Grunde wesentlich länger ausgeführten Luftsperröhring.

4.2.2 Antrieb der Turbomaschine

Die Turbomaschine mit den Antriebsaggregaten steht auf einem gemeinsamen Stahlfundament. Wie aus Abb. 6 erkennbar ist, wird die Tischplatte des Stahlfundamentes von Säulen getragen. Diese Säulen stützen sich auf dem Betonfundament für die Turbogruppe ab. Auf der Tischplatte des Stahlfundamentes befinden sich entsprechende Konsolen, auf denen über Zwischengrundplatten und Lagerböcken die zum Wellenstrang gehörenden Maschinen aufgestellt sind. Dazu gehören neben der Turbomaschine der Synchronmotor mit einer Leistung von 45 MW, der Anwurfmotor mit 4,5 MW Leistung, das Getriebe zwischen Anwurfmotor und Synchronmotor, die Wellendrehvorrichtung und das Steuergetriebe mit 3 Schraubenspindelpumpen zur Ölförderung am Ende des

Wellenstranges. Auf Abb. 6 ist der gesamte Wellenstrang erkennbar.

Der 45-MW-Synchronmotor entspricht im prinzipiellen Aufbau einem leistungsgleichen Generator. Die Maschine hat Luftkühlung für Ständer und Rotor. Zur Wärmeabfuhr sind in den Motor vier wasserbeaufschlagte Kühler eingebaut. Lagerung und Schleifringbrücke sind außerhalb des Maschinengehäuses angeordnet. Die Fremderregung erfolgt über Thyristoren und ist notstromberechtigt, so daß über eine elektrische Bremsung durch Einschaltung eines Wasserwiderstandes in den Ständerkreis der Maschine der gesamte Wellenstrang bei einem Auslegungstörfall innerhalb der Anlage binnen ca. 30 Sekunden abgebremst werden kann. Für die Sicherheit der Anlage ist diese Schnellbremsung im Falle eines Kühlungsausfalles, etwa bei Versagen der Kühlgasversorgung oder einem ähnlichen Störfall, wie z.B. Netzausfall, erforderlich, um zu verhindern, daß das Gas im Kreislauf durch die noch vorhandene Schwunghenergie des Wellenstranges unzulässig aufgeheizt wird.

Zur Beschleunigung des Synchronmotors mit der Turbomaschine auf die Nenn-drehzahl von 3000 min^{-1} ist eine Anwurf-einrichtung vorhanden. Diese Aufgabe erfüllt ein vierpoliger Anwurfmotor, der als Drehstrom-Asynchronmotor mit Schleifringläufer bei 4,5 MW Leistung ausgeführt ist. Mit diesem Anwurfmotor kann der Wellenstrang in ca. 10 Minuten über ein Getriebe auf die Nenn-drehzahl gebracht werden. Bei Erreichen der Nenndrehzahl des Hauptmotors wird dieser synchronisiert und der Anwurfmotor vom Netz getrennt. Während des nachfolgenden Betriebes läuft der Anwurfmotor unbelastet mit. Die Schaltung wurde aus Kostengründen einer statischen mit Thyristoren gesteuerten Hochlauf-einrichtung vorgezogen.

Das Getriebe zwischen Anwurfmotor und Synchronmotor ist als einstufiges Stirnradgetriebe mit horizontal versetzten An- und Abtriebswellen ausgeführt. Am freien Ende der Ritzelwelle ist die Wellendrehvorrichtung angeschlossen. Die Radwelle des Getriebes und der Anwurfmotor sind über eine Zahnkupplung verbunden. Die anderen Kupplungen des Wellenstranges zur Turbomaschine hin sind als starre Kupplungen mit angeschmiedeten Flanschen ausgeführt. Ebenfalls über eine Zahnkupplung ist am Ende des Anwurfmotors und damit des gesamten Wellenstranges das Steuerungsgetriebe angekuppelt. Die drei abtreibenden Wellen dieses Stirnradgetriebes sind mit den am Getriebegehäuse angeflanschten Ölpumpen der Ölversorgung verbunden. Dabei handelt es sich um die Traglagerölpumpe für Turbomaschine und Kühlgasgebläse im

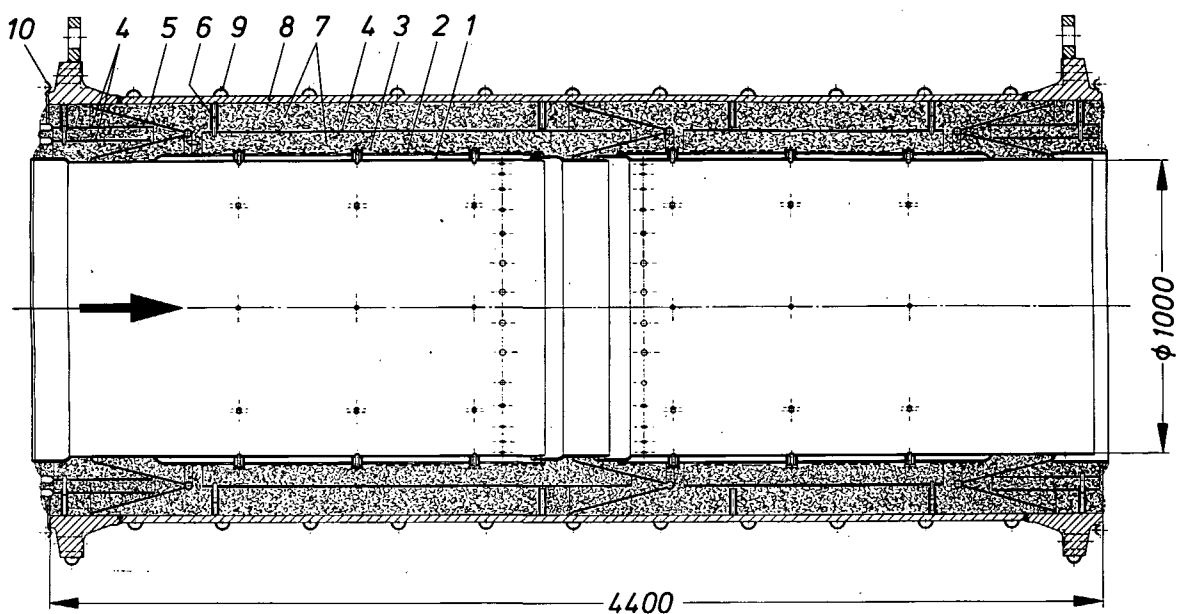
Heliumölsystem, die Schmierölpumpe im Luftölsystem und die Sperrölpumpe im Luftölsystem.

4.2.3 Heißgasleitung

Neben der Turbomaschine verdient die Heißgasleitung besondere Berücksichtigung, da hier erstmals große Heliummassenströme bei hoher Temperatur zu beherrschen sind. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen an Leitungselementen, die im Prinzip einen ähnlichen Aufbau aufwiesen, bestätigten die gewählte Konstruktion /8/ /9/. Der grundsätzliche Aufbau der Heißgasleitung wird gekennzeichnet durch das den Heißgasstrom führende Innenrohr, die umgebende Isolierung und den äußeren drucktragenden Mantel. Die Führung der Heißgasleitung ist im wesentlichen aus den Abbildungen 5 und 6 erkennbar. Sie führt vom Verdichteraustrittsstutzen der Turbomaschine über eine rd. 67 m lange Schleife zurück zum Turbinenstutzen der Turbomaschine. Die Bypass-Schleife, die innerhalb des Hauptleitungssystems angeordnet ist, weist eine Länge von ca. 15 m auf. Die Hauptleitung mit einem Innendurchmesser von 1 m hat hinter dem Bypass-Abzweig und vor der Bypass-Einmündung Regelklappen. Die Bypass-Leitung verfügt über eine verstellbare Absperrklappe. Segmentierte Krümmer im Rohrleitungssystem befinden sich unterhalb der Turbomaschine und an den Eckpunkten des Systems. Der Gasdurchsatz durch die Heißgasleitung wird durch eine Venturidüse bestimmt. Die Leitung ist aus Einzelpositionen zusammengesetzt, wie dies aus der Abbildung 6 ersichtlich ist.

Der Aufbau einer typischen Einzelposition der Heißgasleitung soll an Abb. 13 erläutert werden. Das Gasführungsrohr, oder auch Innenliner genannt, wird umschlossen durch ein gelochtes Blech mit Drahtgewebeauflage als Trennung zur dahinter befindlichen Stopfisolierung. Einseitig wird das Innenrohr durch ein V-förmiges Stützelement am Außenrohr abgestützt. Auf der anderen Seite ist durch eine Schieberverbindung die Möglichkeit zur Aufnahme auftretender thermischer Dehnungen vorgesehen. Im Bereich dieser Schieberstelle befinden sich auch die Druckentlastungsbohrungen, die den Zwischenraum zwischen Innenliner und Lochblech mit dem Gasraum auf der Innenseite verbinden. Der Zwischenraum zwischen dem Lochblech mit Drahtgewebeauflage und dem wassergekühlten Außenmantel ist mit "Kaowool"-Isolationsmaterial ausge-

stopft. Zum Ausgleich eventueller Stopfunregelmäßigkeiten ist außerdem ein konzentrisches Zwischenblech eingefügt, daß über Bolzen am Außenmantel abgestützt wird. Die Stopfdichte des keramischen Fasermaterials beträgt ca. $300 - 320 \text{ kg/m}^3$. Die heißgasbeaufschlagten metallischen Einbauten sind aus dem Werkstoff Inconel 625 gefertigt, die drucktragende Außenwandung aus Feinkornbaustahl. Die Einzelelemente der Leitung weisen Flansche mit Flachdichtungen auf, die mit zusätzlichen Dichtmembranen zu einer gegebenenfalls erforderlichen Verschweißung versehen sind. Der Außenmantel der Heißgasleitung wird über aufgeschweißte Halbrohre wassergekühlt.



- | | |
|-----------------|----------------------|
| 1 Innenliner | 6 Haltebolzen |
| 2 Lochblech | 7 Isolationsstopfung |
| 3 Drahtgewebe | 8 Außenmantel |
| 4 Zwischenblech | 9 Wasserkühlung |
| 5 Stützelement | 10 Schweißlippe |

Abb. 13 Schnitt durch ein Heißgasleitungselement

Im prinzipiellen Aufbau ähnelt der Großteil der in die Leitung eingesetzten Einzelelemente dem vorher beschriebenen. Ein Element der Heißgasleitung, Pos. 13, ist mit einer umfangreichen Zusatzinstrumentierung versehen, im Aufbau jedoch dem vorher beschriebenen Standardleitungselement entsprechend. Hinsichtlich dieser Zusatzinstrumentierung wird auf /10/ verwiesen. Ebenso wird dort auf die Pos. 14 der Heißgasleitung eingegangen, die aus Vergleichs- und Versuchszwecken als Leitungselement mit Metallfolienisolierung in Deck-

plattenbauweise ausgerüstet und mit Zusatzinstrumentierung versehen ist. Zusätzlich weisen diese beiden Positionen der Heißgasleitung am Außenmantel segmentierte Kühlsysteme zur Erfassung der auftretenden Wärmeverluste auf.

Zwei Positionen der Heißgasleitung, nämlich ein gerades Rohrstück und ein Krümmer, sind als Koaxialleitung in HHT-typischer Ausführung gebaut. Abb.14 zeigt als Beispiel den Krümmer dieser vom übrigen Leitungssystem abweichenden Isolierung.

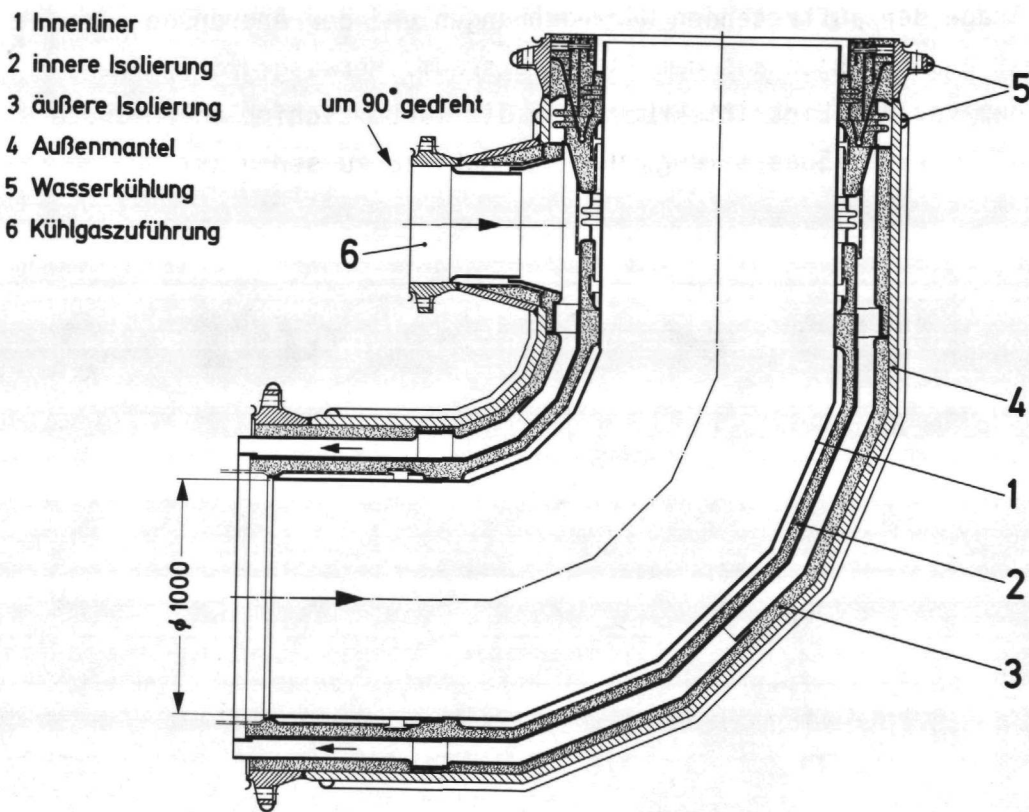


Abb. 14 Schnitt durch Heißgasleitung mit Gaskühlung

Hierbei entspricht die innere Gasführung weitgehend dem vorher kurz erläuterten prinzipiellen Aufbau. Die das Innenrohr mit Lochblech umschließende Isolierung ist in diesem Fall als Matten- und nicht als Stopfisolierung ausgeführt. Nach außen hin schließt sich der Ringraum zur Kühlgasführung an, der zum wassergekühlten Außenmantel durch eine innere Isolierung getrennt ist. Auch hier ist die Konstruktion der Isolierung so ausgeführt, daß Sekun-

därströmungen durch die Isolierung verhindert werden. Dies heißt, daß Druckentlastungsbohrungen aus dem Isolationsraum nur an Stellen neutraler Druckverteilung, also ohne Druckunterschiede, aus dem Isolationsraum geführt werden. Die Kühlgasführung auf der Außenseite erfolgt im Gegenstrom zur Heißgasführung.

Die übrigen Krümmer der Heißgasleitung sowie die Abzweigungen für den Bypass und die Heißgasentnahme weisen insofern andere Konstruktionselemente auf, als daß an diesen Stellen zusätzliche wassergekühlte Bolzen zur Halterung des Innenliners verwandt werden. Besondere Berücksichtigung fand dabei die Frage der auftretenden Wärmedehnungen und der Anordnung der Druckentlastungsbohrungen aus dem Isolationsraum. Herausgegriffen werden soll noch der vor dem Eintrittskrümmer in die Turbomaschine angeordnete Teilefänger in der Heißgasleitung, der auf Abb. 15 zu sehen ist.

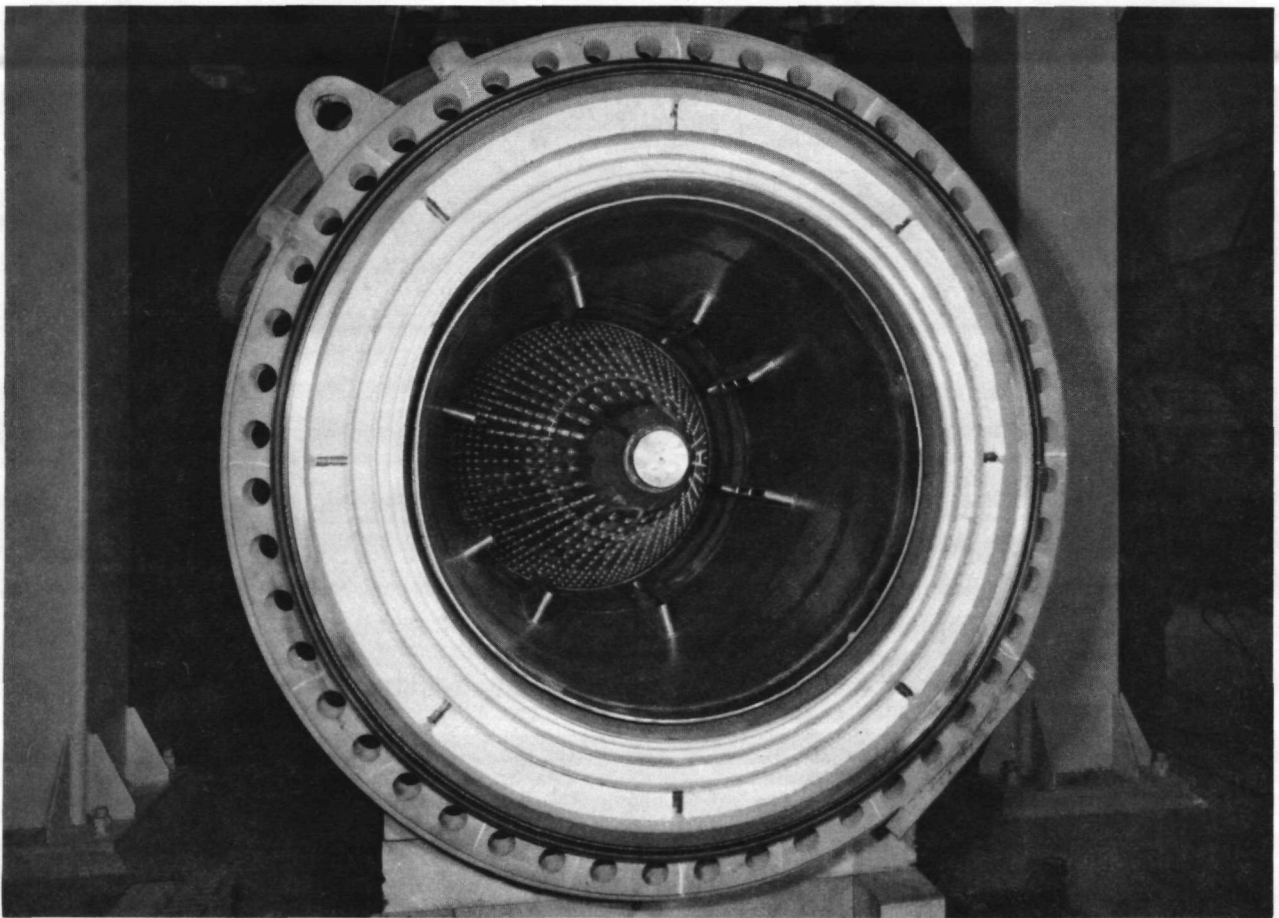


Abb. 15 Kaltgaszumischstelle mit Teilefänger

Dieser Teilefänger besteht aus einem mit Längslöchern versehenen Konus. In Voruntersuchungen wurde eine hinsichtlich der auftretenden Druckverluste optimale Lochanordnung gewählt. Auf dem Bild ist die Spitze des Konus, die in Strömungsrichtung gerichtet ist, zu sehen. Auf der Innenseite trägt der Konus ein Drahtgewebe, um so auch während der Inbetriebnahmephase das Auffangen kleinerer Fremdteile vor dem Eintritt in die Turbomaschine zu verhindern. Der Teilefänger wurde mit Rücksicht auf die für den späteren Teststreckenbehälter vorgesehenen Versuchsvorhaben zum Schutz der Turbomaschine eingesetzt. In Strömungsrichtung unmittelbar hinter dem Teilefänger erfolgt auch die Zuführung des Kaltgasstromes. Um eine möglichst gute Durchmischung mit dem Heißgasstrom zu erreichen, sind düsenartige Einstromöffnungen ausgebildet worden, wie dies auf der Abbildung zu erkennen ist.

Zur Regelung des Heißgasstromes durch die Teststrecke sind Regelklappen in der Heißgasleitung und im Bypass angeordnet. Ebenfalls enthält die Heißgasentnahme aus der Heißgasleitung zwei weitere kleinere Regelklappen. Die beiden großen Klappen in der Heißgasleitung nach dem Bypass-Abzweig und vor der Bypass-Einmündung sind als Durchgangsklappen mit Nennweite 1000 ausgeführt. Bei den kleineren Klappen mit Nennweite 830 in der Bypass-Leitung und Nennweite 400 für die Heißgasentnahme sind Anschlagleisten am Umfang vorgesehen, um unerwünschte Leckverluste an diesen Klappen möglichst zu reduzieren. Keine der Klappen ist allerdings als dichtschießendes Organ ausgeführt. Der prinzipielle Aufbau einer großen Heißgasklappe ist in Abb. 16 dargestellt.

Die horizontal angeordnete gasgekühlte Klappenwelle trägt den um 90° verstellbaren Klappenflügel. Der Klappenflügel ist der Heißgastemperatur ausgesetzt und erreicht diese. Um ein Eindringen der Wärme in die gasgekühlte Klappenwelle möglichst minimal zu halten, ist zwischen Klappenwelle und Klappenflügel eine Isolierung eingebracht. Der Klappenflügel ist durch Paßfedern auf der Klappenwelle fixiert. Die Lagerung für die Klappenwelle befindet sich in wassergekühlten Buchsen. Im Bereich der Stopfbuchse ist die Klappenwelle zusätzlich wassergekühlt. Die Abstützung des Innenliners im Bereich der Heißgasklappe erfolgt wie bei den Krümmern und T-Stücken der Heißgasleitung durch wassergekühlte Bolzen. Die Isolierung zwischen Innenliner und Klappengehäuse ist wie beim überwiegenden Teil der anderen Positionen der Heißgasleitung als Stopfisolierung ausgeführt.

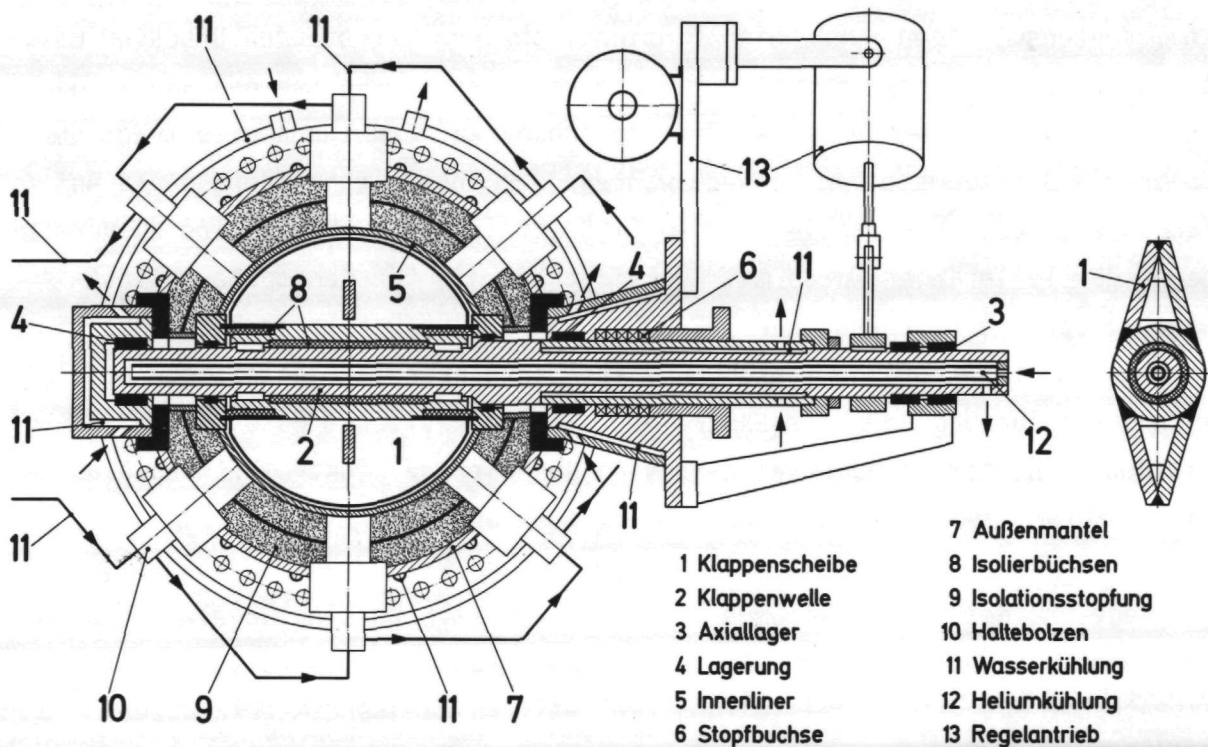


Abb. 16 Schnitt durch Heißgasklappe

Abb. 17 zeigt eine der beiden Klappen für die Hauptleitung im fertig montierten Zustand vor dem Einsatz in die Heißgasleitung. Diese Klappe unterscheidet sich nur durch die Klappenverstelleinrichtung von der in Abb. 16 gezeigten, die pneumatisch betätigt wird und als Regelklappe vor der Bypass-einmündung angeordnet ist. Dagegen wird die Klappe nach der Bypassabzweigung, die auf Abb. 17 zu sehen ist, wegen geringerer Anforderungen bezüglich der Stellzeiten über einen elektromotorischen Motorantrieb betätigt.

In der Hauptschleife der Heißgasleitung sind zwei Kompensationselemente zum Dehnungsausgleich eingebaut, während in der Bypass-Leitung drei Kompensatoren enthalten sind. Diese Kompensatoren tragen dazu bei, Bewegungen des Systems in horizontaler Richtung auszugleichen. Vertikalbewegungen können durch die Federbeine, auf die sich die Leitung abstützt, kompensiert werden. Die Federbeine sind so ausgeführt, daß die Heißgasleitung auf diesen gleiten kann, um Horizontalbewegungen auszuführen. Der Fixpunkt der Leitung liegt unterhalb des Turbomaschinenaustritts.

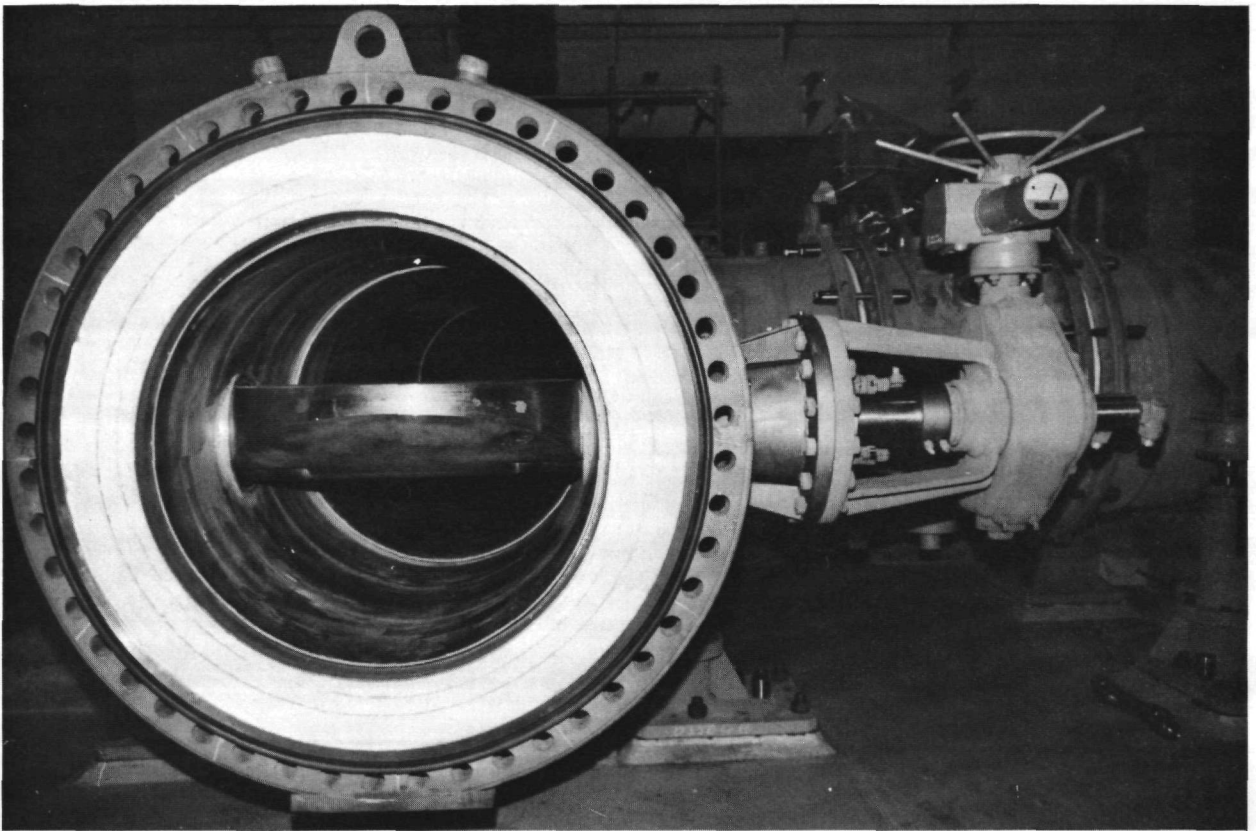


Abb. 17 Zusammengebaute Heißgasklappe Nennweite 1000

4.2.4 Kühlgas- und Sperrgaskreislauf

Bei der Erläuterung des Gesamtkreislaufs wurde auf verschiedene Hilfsgasführungen, die in Abb. 2 zu sehen sind, noch nicht eingegangen. Obwohl diese nur eine Auswahl von wesentlichen Kühl- und Sperrgasführungen im Kreislauf darstellen, wird zweckmäßig noch einmal auf Abb. 2 mit den dort eingezeichneten wesentlichsten Hilfsgasführungen zurückgegriffen. Aus der Heißgasleitung wird nach dem Austritt aus der Turbomaschine ein Teilstrom des Heißgases entnommen. Dieser wird teilweise nach Zumischung von Kaltgas als Kühlgas zur Teststrecke geführt und vereinigt sich dann wieder mit dem restlichen Teilstrom des abgezweigten Heißgases, um in den Sammler zu strömen. Ebenfalls werden zum Sammler die Kühlgasrückführungen aus diversen Stellen des Kreislaufs, insbesondere aus dem Bereich der Turbomaschine, geführt. Nach Mischung dieser Gasströme im Sammler stellt sich eine mittlere Temperatur von 390°C im Auslegungspunkt ein. Mit dieser Temperatur strömt das Kühlgas vom Sammler in den Hauptkühler. Damit die Eintrittstemperatur

für das nachfolgende Kühlgasgebläse mit 236°C im Auslegungspunkt konstant gehalten werden kann; erfolgt die Regelung der Gastemperatur nach dem Hauptkühler durch einen Bypass. Das Kühlgasgebläse verfügt über eine Zwischenentnahme nach der zweiten Verdichtungsstufe des vierstufigen Radialgebläses, über die ca. $2/3$ des Ansaugstromes entnommen werden. Dieses Gas wird zur Kühlung und Sperrung an die Stellen des Kreislaufs geführt, die nur relativ niedrige Druckverluste bei der Durchströmung des Kühlgasstromes aufweisen. Der Rest des Kühlgases wird durch zwei weitere nachfolgende Stufen des Kühlgasgebläses höher verdichtet und in die mit höheren Druckverlusten arbeitenden Kühlstränge geführt. Dies sind insbesondere die verdichterseitige Kühlung der Gasstutzen der Turbomaschine sowie die Leitschauelfußkühlung auf der Verdichterseite und die Rotorkühlung. Ebenso wird an dieser Stelle das Sperrgas abgezweigt und über den Sperrgaskühler geleitet, um zur Trennung der Lagerräume von den auf höherem Temperaturniveau stehenden Stopfbuchsen in die Turbomaschine geführt zu werden. Auf der Hochdruckseite des Kühlgasgebläses wird auch der Gasstrom, der durch die Gasreinigungsanlage geführt wird, entnommen. Dieser wird nach Durchströmen der Gasreinigungsanlage in den Saugstutzen des Kühlgasgebläses zurückgeführt. Die Kühl- und Sperrgasströme, die in die Turbomaschine und an andere Stellen des Kreislaufes, wie etwa die koaxiale Rohrleitungsteststrecke oder die Heißgasklappen, geleitet werden, strömen über den Sammler in den Kühlgaskreislauf zurück. Da Leckverluste des Kühl- und Sperrgaskreislaufes zu erwarten sind, ist die Entnahme aus der Heißgasleitung höher als die Kaltgasrückführung. Die wesentlichsten Gasdaten für den Kühl- und Sperrgaskreislauf sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Für Störfälle, die ein Schnellabfahren der Anlage erfordern, ist ein Heißgaskühler vorgesehen. Bei Druckentlastung des Kreislaufs strömt das Heißgas aus der Heißgasleitung direkt in diesen Heißgaskühler und von dort über den notstromversorgten zwangsbelüfteten Sperrgaskühler in das Heliumlager. Für außerordentliche Störfälle besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die Kreislauffüllung nach dem Heißgaskühler direkt in die Atmosphäre zu geben.

Die Abb. 18 zeigt eine Teilansicht auf wesentliche Teile des montierten Kühlgaskreislaufes. Insbesondere ist dort das Kühlgasgebläse mit den Anschlüssen zu sehen. Vom Hauptkühler kommend tritt die Saugleitung von oben in die Maschine ein. Die Zwischenentnahme wird in der Mitte der Maschine nach unten abgeführt, während die Hochdruckentnahme auf der Antriebsseite

wiederum oben angeordnet ist.

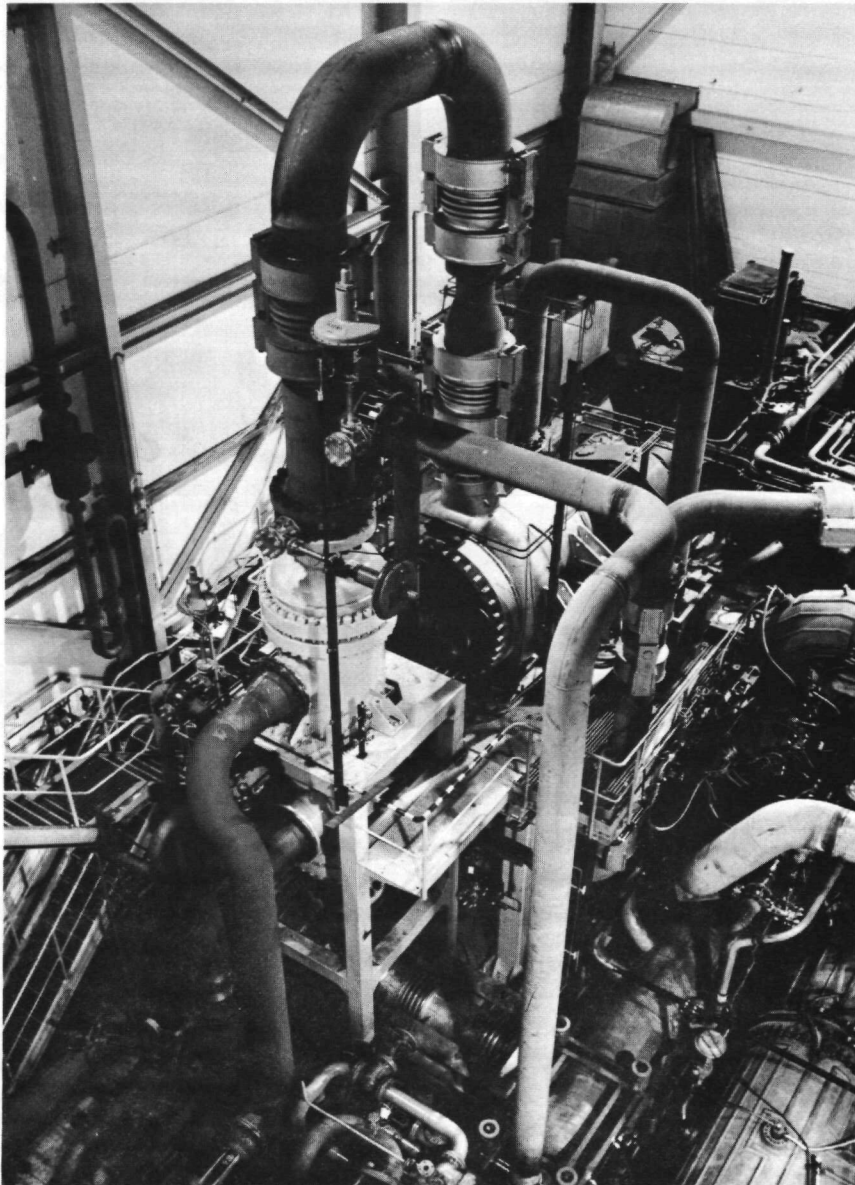


Abb. 18 Teilansicht des Kühlgaskreislaufes mit Hauptkühler und Kühlgasgebläse sowie verbindenden Rohrleitungen

Eine Vorstellung vom prinzipiellen Aufbau der Maschine vermittelt Abb. 19. Die Maschine ist in geschweißter Gehäuseform in Topfbauweise ausgeführt. Der Deckel für das Außengehäuse befindet sich auf der Nichtantriebseite. Von dort ist das geteilte Innengehäuse in die Maschine eingeführt. In das Innengehäuse sind die Gasführungskanäle eingesetzt. Vom Saugstutzen kommend

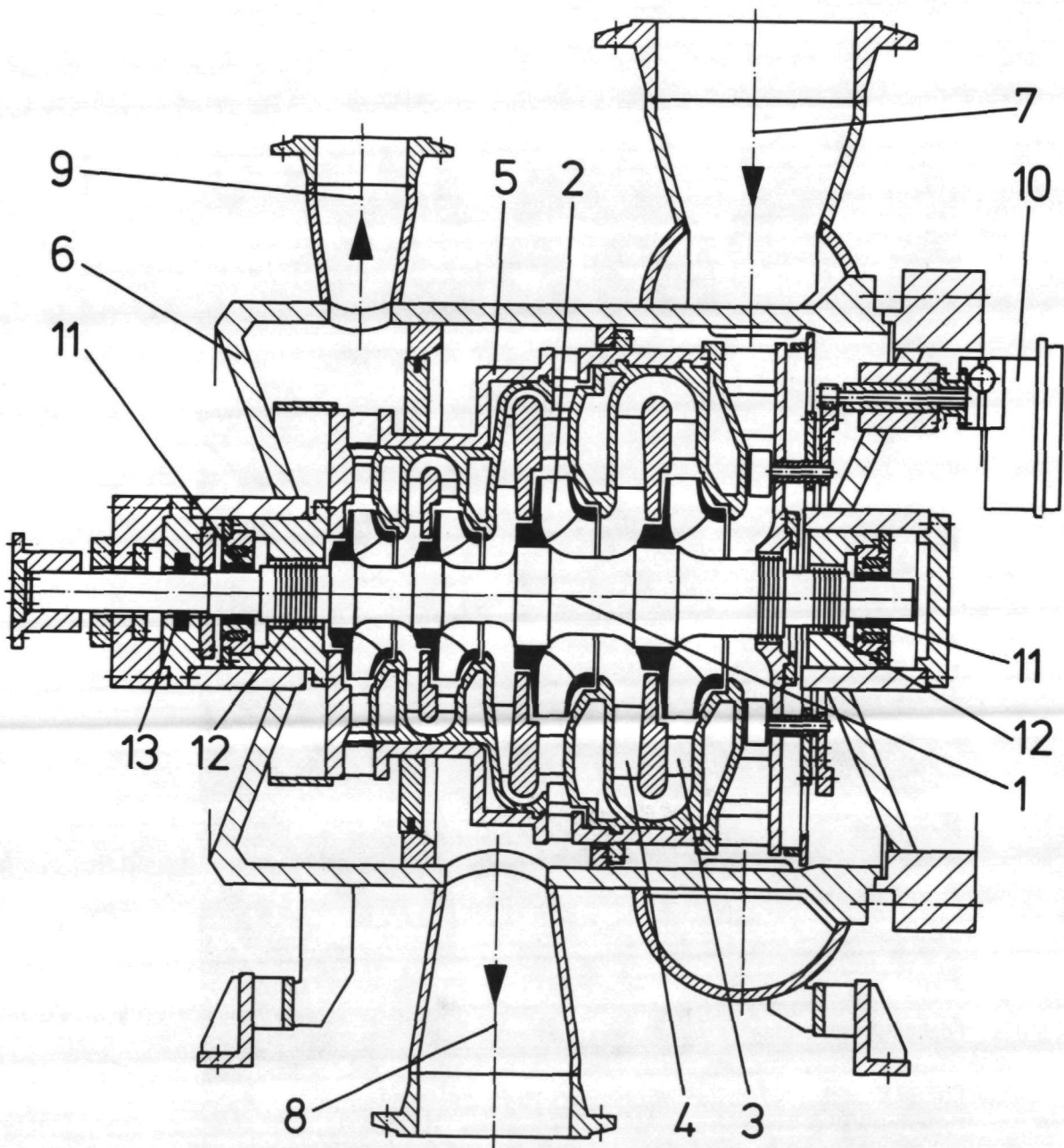


Abb. 19 Prinzipschnittbild HHV-Kühlgasgebläse mit

- | | | |
|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1 Welle | 6 Außengehäuse | 10 Vordrallregelung |
| 2 Laufschaufel | 7 Eintrittsstutzen | 11 Traglager |
| 3 Austrittsdiffusor | 8 Zwischenentnahme | 12 Labyrinth |
| 4 Umlenkanal | 9 Austrittsstutzen | 13 Wellendichtung |
| 5 Innengehäuse | | |

strömt das Gas zunächst radial nach innen durch verstellbare Leitschaufeln, die eine Vordrallregelung ermöglichen. Es schließen sich zwei hintereinander geschaltete radiale Verdichtungsstufen mit Laufrädern von jeweils 710 mm Außendurchmesser an. Nach der zweiten Stufe folgt die bereits besprochene

Teilentnahme. Der Rest des Gasstromes wird in zwei nachfolgenden, ebenfalls radialen Verdichtungsstufen mit Laufrädern von jeweils 500 mm Durchmesser auf 53,5 bar und damit den höchsten Gasdruck im System verdichtet. Die Diffusorkanäle für sämtliche Stufen haben eine Leitbeschaufelung. Auf die verstellbare Beschaufelung im Ansaugkanal der ersten Stufe wurde bereits eingegangen. Die anderen Stufen verfügen ebenfalls über eine Beschaufelung in den Umlenkanälen, in denen die Zuströmungen radial nach innen gerichtet von der vorangehenden Stufe erfolgen.

Die Maschine verfügt nur über Radiallager. Innerer Gasraum und der Lagerölbereich sind durch Labyrinth mit Sperrgasversorgung getrennt. Auf der Antriebseite verfügt die Maschine über ein Wellendichtungssystem, das im prinzipiellen Aufbau dem der Turbomaschine entspricht. Der Antrieb des Kühlgasgebläses erfolgt über einen 6,5-MW-Asynchronmotor. Zwischen dem Motor mit einer Drehzahl von 1491 min^{-1} und dem Kühlgasgebläse ist ein Stirnradgetriebe angeordnet, das die Drehzahlübersetzung auf 7765 min^{-1} für das Kühlgasgebläse erbringt und gleichzeitig den Axialschub aufnimmt. Ein Schwungrad auf der Ritzelwelle des Getriebes verlängert die Auslaufzeit des Gebläses nach Anlagenstörfällen, die ein Schnellabfahren der Anlage erfordern. Dadurch kann die Gaskühlung wichtiger Komponenten der Anlage so lange wie erforderlich aufrecht erhalten werden.

Der Kühl- und Sperrgaskreislauf enthält als Wärmesenken den Hauptkühler, den Sperrgaskühler und den Heißgaskühler. Auf den Hauptkühler wird noch im nachfolgenden Abschnitt eingegangen. Der mit gerippten Rundrohrbündeln versehene Sperrgaskühler wird von unten durch Axialventilatoren zwangsbelüftet. Über einen Bypass und vier Ventilatoren ist dieser Kühler in gewissen Grenzen regelbar.

Der Heißgaskühler ist nur für den Schnellabfahrvorgang erforderlich. Der Wärmetauscher steht außerhalb des Gebäudes und ist durch eine innen isolierte Rohrleitung ohne zwischengeschaltete Absperrarmaturen mit der Heißgasleitung verbunden. Absperrarmaturen und die Sicherheitsarmatur für den gesamten Kreislauf befinden sich hinter dem Heißgaskühler. Der Wärmetauscher besteht im wesentlichen aus dem äußeren Gehäuse mit einer Wasserfüllung von ca. 14 m^3 vollentsalztem Wasser und dem innen liegenden Rohrbündel, das mit Wasser überdeckt ist. Das Helix-Rohrbündel ist auf Abb. 20 zu sehen. Heißgas strömt in den unteren Kugelkollektor ein. Dieser verfügt

über ein innen liegendes Hemd zur Heißgasführung. Vom Kugelkollektor her werden die einzelnen Helix-Rohre beaufschlagt. Im oben sichtbaren Ringkollektor wird das auf ca. 260°C abgekühlte Gas gesammelt. Von dort wird es aus dem Wärmetauscher zum Sperrgaskühler geleitet.

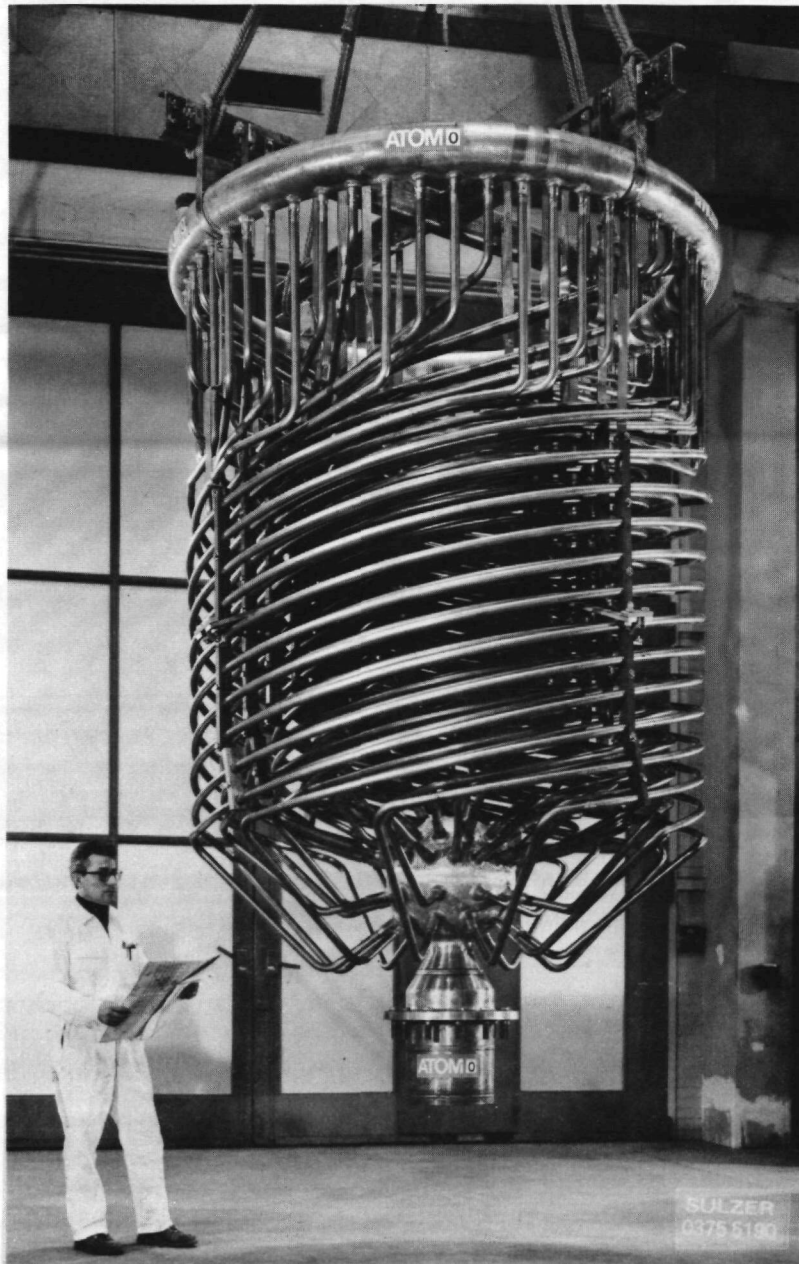


Abb. 20 Inneneinbauten des Heißgaskühlers

Einzelne Stränge der Rohrleitungsführung für den Kühl- und Sperrgaskreislauf sind aus den Abbildungen 5, 6 und 18 ersichtlich. Die Entnahmeleitungen aus dem Heißgasleitungssystem sind in ihrem Aufbau entsprechend diesen ausgeführt. Einbauten tragen ferner die Leitungen, die das Heißgas bis zum Sammler führen. Alle anderen Leitungen sind als normale Rohrleitungen ausgeführt. Nur soweit erforderlich erfolgt die Dehnungskompensation durch Kompensatoren. Größtenteils sind die Hilfgasleitungen außen isoliert. Als Regelarmaturen sind Klappen mit pneumatischer Steuerung in die Leitungen eingebaut. Auf die mit Heißgas beaufschlagten Klappen in Sonderausführung wurde bereits eingegangen.

4.2.5 Kühlwassersysteme

Es wurden bereits die gasseitigen Wärmesenken des HHV-Kreislaufes erläutert. Dabei wurde auch auf das Sperrgas-Kühlsystem eingegangen, das einen Teil der HHV-Rückkühlanlage darstellt. Neben diesem Sperrgaskühlsystem mit direktem Wärmeaustausch vom Kreislaufmedium Helium an die Umgebungsluft sind noch vorhanden der geschlossene Hauptkühlwasserkreislauf und der offene Kühlwasserkreislauf, der seinerseits wieder einen geschlossenen Zwischenkreislauf aufweist. Die Auswahl dieser auf den ersten Blick recht komplex anmutenden Schaltung der verschiedenen Kühlstränge war das Ergebnis einer Vorstudie, bei der wirtschaftliche und betriebstechnische Gesichtspunkte auch von drei anderen möglichen Konzepten vergleichend betrachtet wurden.

Der Hauptkühlkreislauf ist in Abb. 21 schematisch dargestellt. Das Helium des Kühlgaskreislaufes strömt durch den Heliumkühler, der auch als Hauptkühler bezeichnet wird, in dem die Abwärme des Heliums an ein geschlossenes Kühlwassersystem übertragen wird. Drei Pumpen wälzen das Kühlmedium im geschlossenen Kreislauf um und führen es dem Trockenkühler zu, wo die Abwärme an die Umgebungsluft abgeführt wird.

Der Hauptkühler zum Abkühlen des Heliums ist als Rohrbündelwärmetauscher mit glatten Rohren mit Gasströmung auf der Innenseite ausgeführt. Vollentsalztes Wasser mit "Antifrogen N"-Zusatz als Frostschutzmittel umströmt im Gegenstrom die Rohre. Im Auslegungspunkt wärmt sich dabei das Kühlwasser von 61°C auf 99°C auf bei einem Durchsatz von 1200 m³/h. Über Rohrleitungen strömt

das Kühlwasser von dem innerhalb der HHV-Halle angeordneten Helium-Kühler zu den außen liegenden Trockenkühltürmen (Abb. 21).

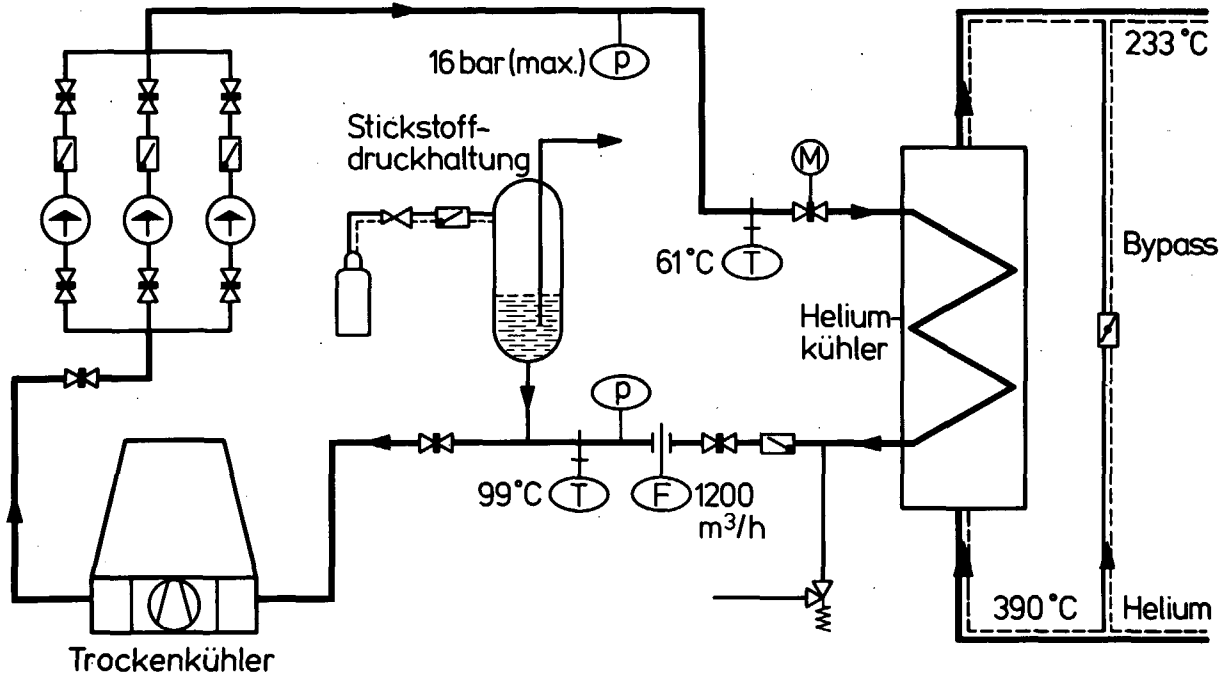


Abb. 21 Hauptkühlwasserkreislauf

Der luftgekühlte Wärmetauscher besteht im wesentlichen aus den Wärmetauscherelementen, den Ventilatoren mit Antrieb und der Unterstützungskonstruktion. Das Kühlwasser strömt durch die berippten ovalen Rohre der Wärmetauscherelemente. Die Kühlluft wird durch Axialventilatoren von unten her durch die Kühlelemente gefördert. Der Antrieb der Ventilatoren erfolgt über Elektromotoren über Keilriemenantrieb. Insgesamt weist der Trockenkühler 6 Doppelemente, jeweils mit Ventilator, auf. Das rückgekühlte Wasser wird von drei Radialpumpen mit je $400 \text{ m}^3/\text{h}$ Förderleistung angesaugt. Die eingesetzten Normpumpen mit axialem Saug- und radialem Druckstutzen liefern ca. 2,5 bar Druckunterschied. Die Kreispumpen sind einstufig und einflutig in horizontaler Anordnung mit Lagerbock gebaut. Das Laufrad ist fliegend auf der Welle angeordnet.

Die Druckhaltung im System erfolgt über ein Stickstoffgaspolster im Ausgleichsbehälter. Der Ansprechdruck des Sicherheitsventils im System beträgt 16 bar. Eine eigentliche Regelmöglichkeit im Kühlwassersystem besteht nicht,

da diese gasseitig vorgenommen wird. Eine Anpassung des Kühlkreislaufes an eventuell unterschiedlich abzuführende Wärmemengen aus dem Hauptgaskühler bzw. an geänderte Umgebungsbedingungen kann über Zu- bzw. Abschaltung von einzelnen Umwälzpumpen oder Ventilatoren des Kühlsystems erfolgen.

Eine Ansicht des Wasser-Luft-Kühlers zeigt Abb. 22. Die linke Seite dieses Fotos zeigt den Wärmetauscher sowie vorgelagert rechts den Sperrgaskühler und die Wand des Pumpenhauses.



Abb. 22 Wasser-Luft-Kühler und Sperrgaskühler

Im Hauptkühlsystem werden ca. bis zu 43,5 MW, im Sperrgaskühler ca. 2,5 MW abgeführt. Die restliche ins System über die verschiedenen Antriebe eingebrachte Leistung führt das offene Kühlwassersystem ab. Dieses ist schematisch auf Abb. 23 dargestellt. Mit diesem System werden diverse Kühlstellen des Kreislaufs versorgt. Teilweise erfolgt die Versorgung mit dem offenen Kühlwasser direkt, wie etwa für die He-Reinigungsanlage, die Motorkühlung des 45-MW-Motors, den Notstromdiesel oder die Ölkühler. Für den gesamten Bereich der Heißgasleitung wurde ein zusätzlicher geschlossener Zwischen-

kreislauf eingesetzt. Aufgrund der nicht zu vermeidenden Verunreinigungen im offenen Kühlwassersystem wurde dieser geschlossene Zwischenkreislauf zur Kühlung der Heißgasleitung eingesetzt, um eine Verstopfung oder Zusetzung der weit verzweigten und teilweise im Durchströmquerschnitt engen Kühlkanäle im Bereich der Heißgasleitung zu vermeiden. Als Wärmeaustauscher für diesen Zwischenkreislauf wurde ein Plattenwärmetauscher gewählt, der primärseitig parallel zu den sonstigen Verbrauchern des offenen Kühlwasserkreislaufs geschaltet ist. Sekundärseitig strömt im geschlossenen Kreislauf vollentsalztes Wasser zur Kühlung der Heißgasleitung. Dieses wird über drei parallel geschaltete Pumpen mit einer gesamten Förderleistung von $150 \text{ m}^3/\text{h}$ umgewälzt. Die Druckhaltung in diesem System erfolgt über eine Stickstoffvorlage.

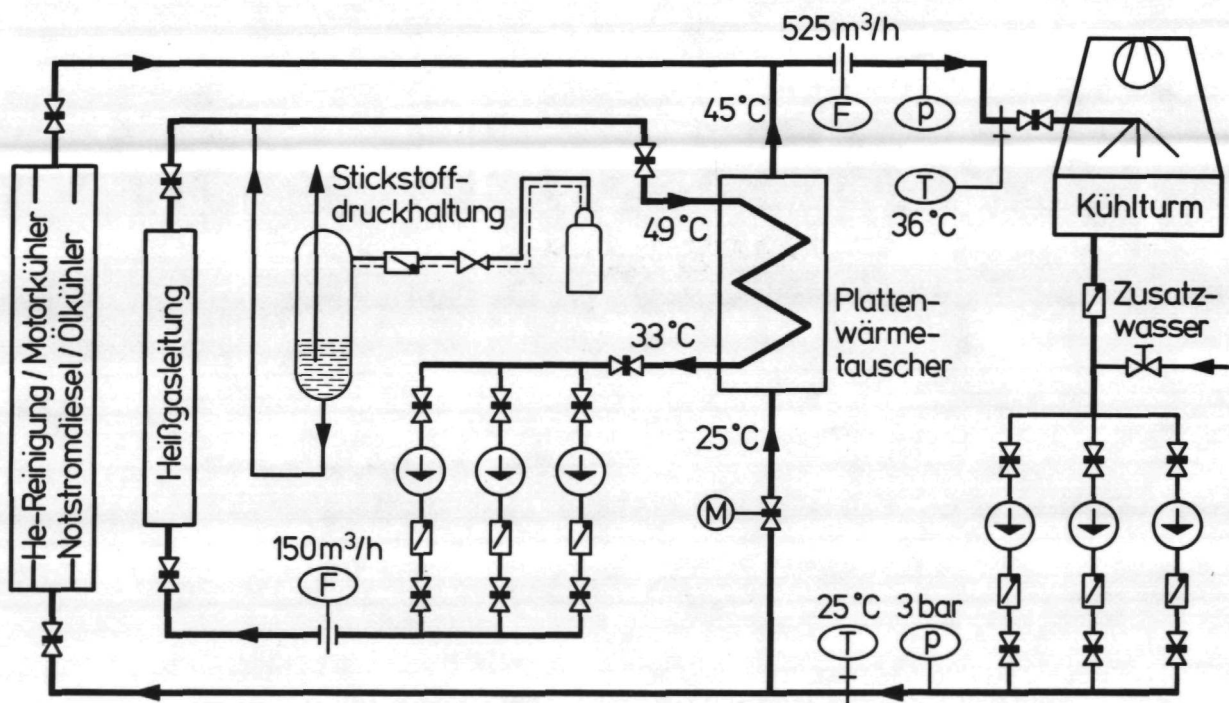


Abb. 23 Schaltung des offenen Kühlwassersystems

Im offenen System werden $525 \text{ m}^3/\text{h}$ Kühlwasser mit drei parallel geschalteten Kreislumpen umgewälzt. Die Wärmeabgabe aus dem System erfolgt über drei parallel geschaltete offene Kühltürme. Dabei handelt es sich um kleine Zellenkühler mit eingebauten Kunststoffrieselgittern. Die darüber angeordnete Wasserverteilung erfolgt in Kunststoffrinnen, in denen Spritzaggregate, bestehend aus Spritzrohren und -tellern, angebracht sind. Das abgekühlte

Wasser sammelt sich unterhalb des Kühlers in Auffangbecken, von denen es über die Pumpen erneut zu den Kühlstellen geführt wird. Im Gegenstrom zum herabrieselnden Wasser wird von einem oben auf dem Kühler angeordneten Axialventilator Kühlluft durch den Kühler gesaugt. Der Antrieb dieser Ventilatoren erfolgt durch umschaltbare Getriebemotoren. Mit zwei Drehzahlbereichen für diese Ventilatoren besteht die Möglichkeit einer gestuften Regelung zur Anpassung an sich ändernde äußere Bedingungen oder die Wärmeabgabe während des Betriebes.

Die Pumpen für das offene Rückkühlsystem sind im Pumpenhaus untergebracht, während die Pumpen für den geschlossenen Zwischenkreislauf dieses Systems im Rohrkeller der HHV-Halle stehen. Die verbindenden Rohrleitungen zwischen Pumpenhaus und HHV-Anlage sind wie für das geschlossene Kühlsystem durch den Verbindungskanal gelegt. Zu den hinter dem Pumpenhaus angeordneten Kühltürmen führen unterirdisch verlegte Rohrleitungen. Zur Nachspeisung der Verdunstungsverluste sowie zur Aufrechterhaltung der ständigen Abschlämmung des Systems werden in das offene Kühlwassersystem während des Betriebes ca. $20 \text{ m}^3/\text{h}$ Frischwasser aus dem Brauchwassernetz der KFA gespeist.

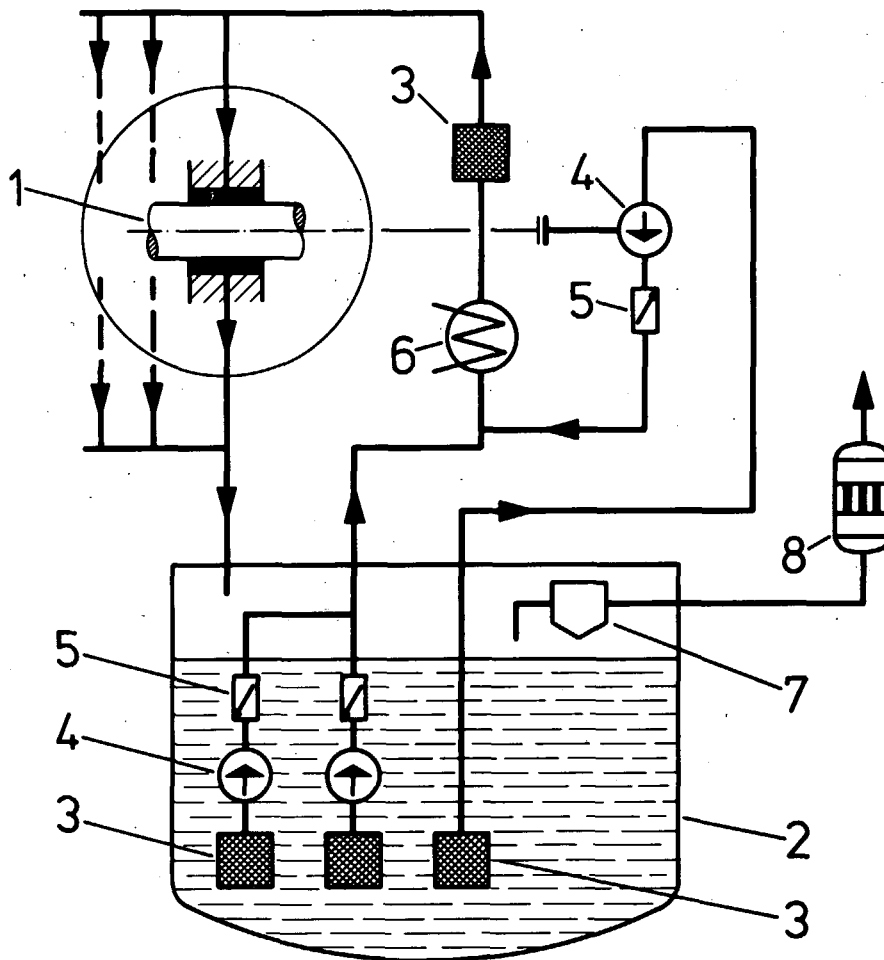
Eine Zusatzinstrumentierung der Kühlwassersysteme der HHV-Anlage gestattet eine Wärmebilanzierung für die einzelnen Kreisläufe.

4.2.6 Ölversorgung und Ölkreisläufe

Die zentrale Ölversorgung für die HHV-Anlage ist aufgeteilt in Einzelsysteme für die Heliumlagerölversorgung, die Luftlagerölversorgung, die Heliumsperrölversorgung, die Vakuumperrölversorgung und die Luftsperrölversorgung. Die Füllmenge für diese miteinander in Verbindung stehenden Systeme beträgt ca. 20 m^3 Turbinenöl mit 4,5°E bei 50°C. Auf wesentliche Aufgaben, die das Sperrölssystem zu übernehmen hat, wurde bereits bei der Beschreibung der Turbomaschine unter Abschnitt 4.2.1 eingegangen.

Mit der Heliumlagerölversorgung werden die Traglager von Turbomaschine und Kühlgasgebläse versorgt. Über die Öl Ablaufleitungen steht der Heliumlagerölbehälter direkt in Verbindung mit den Lagerräumen, die sich auf einem Druck von ca. 52,5 bar im Auslegungspunkt befinden. Im Normalbetrieb erfolgt die

Lagerversorgung über die Heliumlagerölhauptpumpe, die am Steuergetriebe des Hauptwellenstranges angeflanscht ist und aus dem Heliumlagerölbehälter ansaugt.



- | | |
|-------------------------|--------------------|
| 1 Lagerung | 5 Rückschlagklappe |
| 2 Heliumlagerölbehälter | 6 Kühler |
| 3 Filter | 7 Ölabscheider |
| 4 Ölpumpe | 8 Aktivkohlefilter |

Abb. 24 Prinzipschaltung des Heliumlagerölkreislaufes

Über den Ölkühler und einen nachgeschalteten Filter erfolgt die Förderung zu den Lagerstellen. Für das An- und Abfahren und das Lagerkühlen nach dem Abstellen der Anlage sind die Unterölpumpen im Heliumlagerölbehälter vorgesehen. Sie sind jeweils für ca. die halbe Menge der Hauptpumpe ausgelegt, d.h.

je ca. 60 % der erforderlichen He-Lagerölpumpe, und speisen über Rückschlagventile ins Lagerölsystem. Bei An- und Abfahrbetrieb gehen sowohl die He-Lagerölhilfspumpe als auch die He-Lagerölnotpumpe in Betrieb. Beide sind notstromberechtigt. Auch bei Ausfall einer der beiden Pumpen kann die Anlage noch sicher nach dem Schnellabfahrprogramm abgefahren werden. Überwacht werden: Füllstand, Temperaturen, Drücke und Differenzdrücke im System.

Die prinzipielle Schaltung des He-Lagerölkreislaufs ist aus Abb. 24 ersichtlich. Symbolisch wird dort nur eine Lagerstelle gezeigt. Der He-Lagerölbehälter innerhalb der Anlage mit den Anschlußleitungen ist aus Abb. 25 ersichtlich.

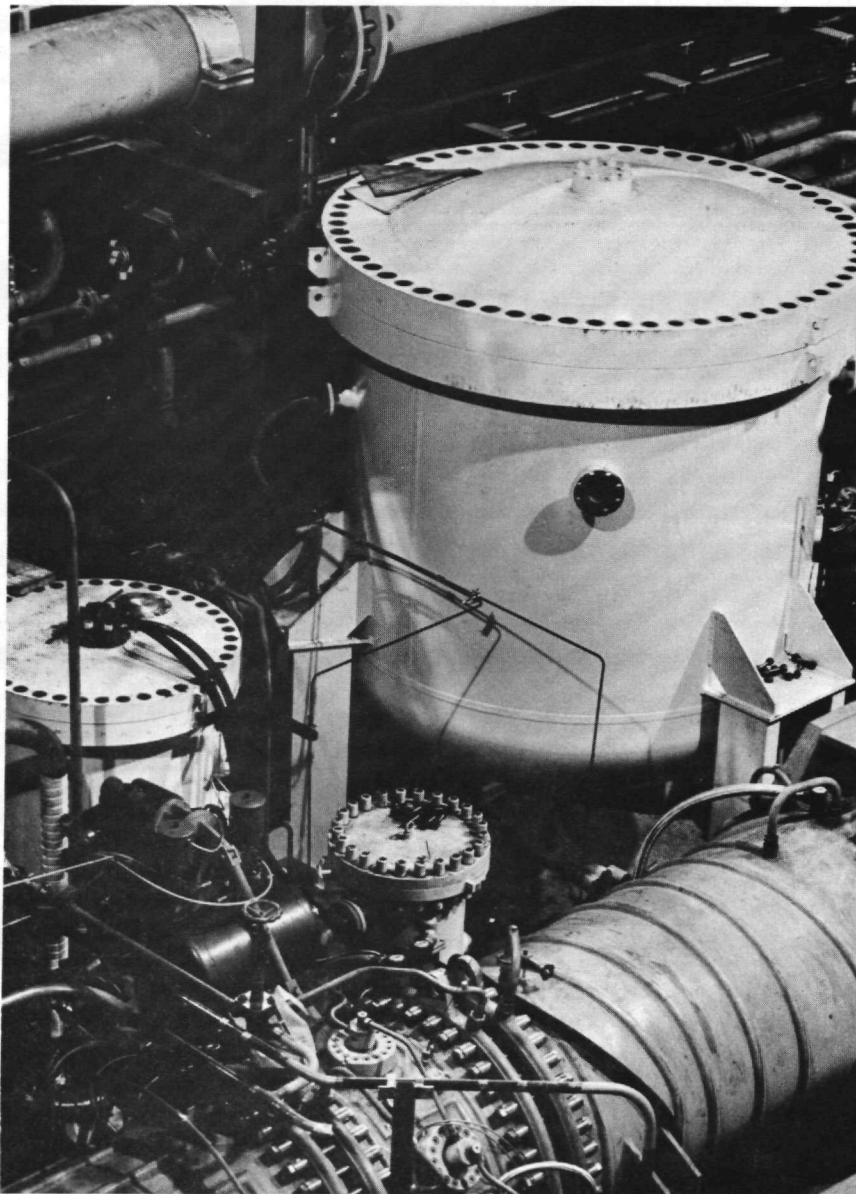


Abb. 25 Teilansicht der Anlage mit He-Lagerölbehälter (großer Behälter) und He-Sperrölbehälter mit Anschlußrohrleitungen

Die Ölversorgung der Hochspannungsantriebsmotoren und der zwischengeschalteten Getriebe einschließlich des Kammlagers für die Turbomaschine erfolgt aus dem Luftlagerölbehälter, siehe Abb. 26.

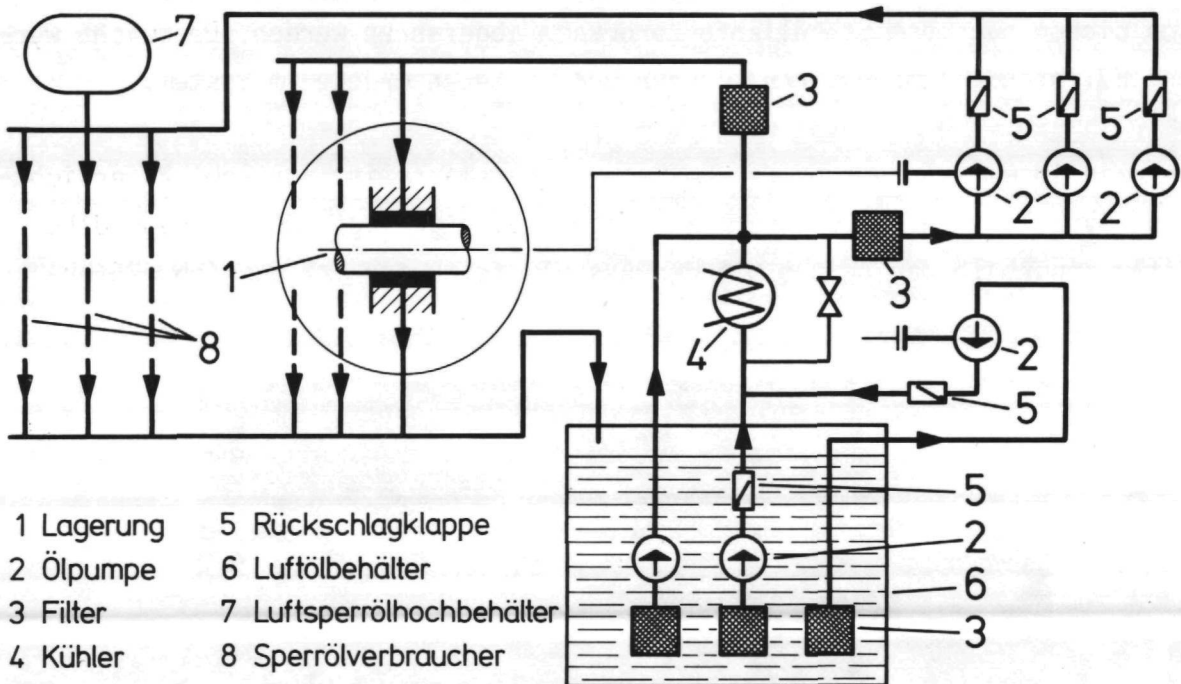


Abb. 26 Kreislaufschema Luftölsystem mit Lager- und Sperrölversorgung

Bei Normalbetrieb fördert die über das Steuergetriebe vom Hauptwellenstrang mechanisch angetriebene Hauptpumpe das Luftlageröl aus dem Luftölbehälter über Kühler und Filter zu den Lagerstellen. Zum An- und Abfahren und Lagerkühlen nach dem Abfahrbetrieb der Anlage dient die mit Notstrom versorgte Luftlagerölhilfspumpe, eine Zahnrادpumpe mit Drehstrommotor. Neben dieser für ca. 80 % der Hauptpumpenmenge ausgelegten Pumpe ist als zusätzliche Sicherheit eine ebenfalls mit Notstrom versorgte Luftlagerölnotpumpe eingebaut, die bei Ausfall der Hilfspumpe während des Schnellabfahrens der Anlage die erforderliche Ölmenge liefert. Auch diese Pumpe ist für 80 % der Hauptpumpenmenge ausgelegt. Zur Vermeidung unnötiger Druckverluste fördert sie nicht über den Ölkühler.

Bei der Beschreibung der Wellendichtung für die Turbomaschine wurde bereits auf die wesentliche Funktion des Luftsperrölsystems hingewiesen, das den vollen Differenzdruck vom Anlagendruck auf den Umgebungsdruck abbauen muß.

Damit handelt es sich hier um den wichtigsten Teil der Dreikreis-sperrung. Das Luftsperröl wird aus dem Luftlagerölssystem den Luftsperrölpumpen zugeführt. Mit Hilfe einer regelbaren Kühlerumgehung kann der Sollwert für die Sperrölvorlauftemperatur geregelt werden. Im Normalbetrieb fördert die über das Steuergetriebe mechanisch angetriebene Hauptpumpe das Sperröl über eine Rückschlagklappe in die Luftölschwimmringe von Turbomaschine und Kühlgasverdichter. Für den An- und Abfahrbetrieb der Anlage sind die mit Notstrom versorgten Hilfs- bzw. Reservepumpen zuständig. Auch diese sind Schraubenspindelpumpen, die mit Drehstrom angetrieben werden. Für den Fall des gleichzeitigen Versagens der Haupt- und Hilfspumpe ist der Sperrölhochbehälter vorgesehen, um einen Gasdurchbruch durch die Schwimmringe zu verhindern. Er ist in einer Höhe von ca. 7 m über der Turbomaschinenachse angeordnet und für eine Auslaufzeit bei max. Ölbedarf der Luftölspernung von ca. 1 min. ausgelegt. Da die Turbomaschine bei Schnellabfahren innerhalb von ca. 30 Sek. abgebremst wird und nach dem Stillstand die Stillstands-dichtung angelegt wird, steht danach die restliche Sperrölmenge aus dem Hochbehälter für die Sperrung des noch auslaufenden Kühlgasgebläses zur Verfügung.

Auf die Aufgabenstellung für das He-Sperrölssystem und das Vakuumsperrölssystem wurde bereits bei der Beschreibung der Turbomaschine eingegangen. Die Versorgung des He-Sperrölsystems erfolgt aus dem He-Sperrölbehälter, der gasseitig in Verbindung steht mit dem He-Lagerölbehälter. Die prinzipielle Schaltung für den He-Sperrölkreislauf und den Vakuumsperrölkreislauf ist aus Abb. 12 ersichtlich. Da das Vakuumöl nach dem Austritt aus den Vakuumölschwimmringen dem benachbarten Luft- bzw. He-Sperrölssystem zu je ca. 50 % zufließt, also keinen eigenen Rücklauf besitzt, muß der Vakuumölanteil aus den entsprechenden Systemen ergänzt werden. Die Einschleusung des luftseitigen Vakuumöls vom Luftölbehälter in den Vakuumölbehälter erfolgt in Intervallen durch das zwischen den beiden Behältern herrschende Druckgefälle von ca. 1 bar. Im Gegensatz hierzu wird der der Heliumseite zuströmende Vakuumölanteil kontinuierlich geregelt über den He-Ausscheidebehälter dem Vakuumölbehälter zugeführt. Das im He-Ausscheidebehälter entgasende Helium wird über einen Membrankompressor zurück in den Sperrölbehälter gefördert und strömt von dort in den He-Lagerölbehälter. Das aus den Lager-räumen mitgeführte ölbenetzte Helium der Sperrgasversorgung wird über einen Grobabscheider aus "Raschigringen" und einen Ölabscheider mit Glaswolle und Aktivkohleeinsatz zur Mischstrecke im Kühl- und Sperrgassystem zurückge-

führt. Das Vakuum im Vakuumölbehälter wird über eine mit Notstrom versorgte Vakuumpumpe aufrecht erhalten.

4.2.7 Gasreinigung und Gasversorgung

Die Heliumreinigungsanlage hat in erster Linie die kontinuierliche Reinigung des Kreislaufs bei Betrieb der HHV-Anlage sicherzustellen. Die Heliumversorgungsanlage übernimmt die Funktion des Füllens, Druckhaltens bei Betrieb der Anlage und der Kreislaufentleerung einschließlich Abspeicherung des Heliums. Aus dem in Abb. 2 dargestellten Gesamtschema geht auch die grundsätzliche Schaltung der Gasreinigungs- und Gasversorgungsanlage innerhalb des HHV-Gesamtkreislaufs hervor. Die Gasversorgungsanlage besteht im wesentlichen aus den Heliumvorratsbehältern, zwei Kompressoren und einer Vakuumpumpe. Das Heliumlager, bestehend aus 7 Speicherbehältern bei 60 bar Speicherdruck und 26 m^3 Speichervolumen sowie einem zusätzlichen Sperrgasbehälter von 20 m^3 , ist so bemessen, daß das gesamte Heliuminventar des HHV-Kreislaufs einschließlich einer gewissen Reservemenge gespeichert werden kann. Aus dem Sperrgasbehälter wird für den Störfall die erforderliche Heliumsperrgasversorgung für die Turbomaschine sichergestellt. Die beiden Kompressoren fördern das Helium vom Heliumlager in den Kreislauf bzw. aus dem Kreislauf zurück in das Heliumlager. Ferner ist mit diesen Kompressoren das Umpumpen des Gases von einen Lagerbehälter in den anderen durch die Gasreinigung möglich.

Die Abspeicherung des Gases in Einzelbehälter wurde gewählt, um so durch Ausströmen des Gases aus den einzelnen Behältern bis zum jeweiligen Ausgleichsdruck einmal den Füllvorgang, zum anderen den Entleerungsvorgang in umgekehrter Reihenfolge abzukürzen. So ist während der Füllung nur die Restgasmenge aus den jeweiligen Behältern über die Kompressoren in die Anlage zu fördern. Während des konstanten HHV-Anlagenbetriebes stehen sodann leere Speicherbehälter zur Verfügung, in die beim Schnellabfahren der Anlage das Gas aus dem Kreislauf über den Heißgaskühler und den Sperrgaskühler aufgenommen werden kann, siehe Abb. 2.

Die vierstufigen Trockenlaufkompressoren sind in stehender Bauart mit Zylindern in Reihenordnung ausgeführt. Die Kolben mit Labyrinthdichtungen sind

einfach wirkend. Die Förderleistung ist ca. 0,024 kg/s bei 60 bar Enddruck. Für die Evakuierung der HHV-Anlage enthält die Heliumversorgungs- und -reinigungsanlage eine Vakuumpumpe mit vorgeschaltetem Kondensatabscheider sowie Ölnebelabscheider. Mit dieser Pumpe ist die Evakuierung des Kreislaufs bis in den Bereich von 1 Torr bei einem minimalen Ansaugdruck der Pumpe von < 1 Torr möglich. Das Saugvermögen der 1-stufigen Drehschieberpumpe mit 2-stufigem Gasballastventil beträgt 360 m³/h.

In die Gasversorgungsanlage integriert ist die Heliumreinigungsanlage. Bei Betrieb der HHV-Anlage wird ein Teilgasstrom von ca. 1000 Nm³/h hinter der letzten Verdichtungsstufe des Kühlgasgebläses entnommen und über die Gasreinigungsanlage geführt. Von dort strömt dieser Teilstrom zurück zum Saugstutzen des Kühlgasgebläses.

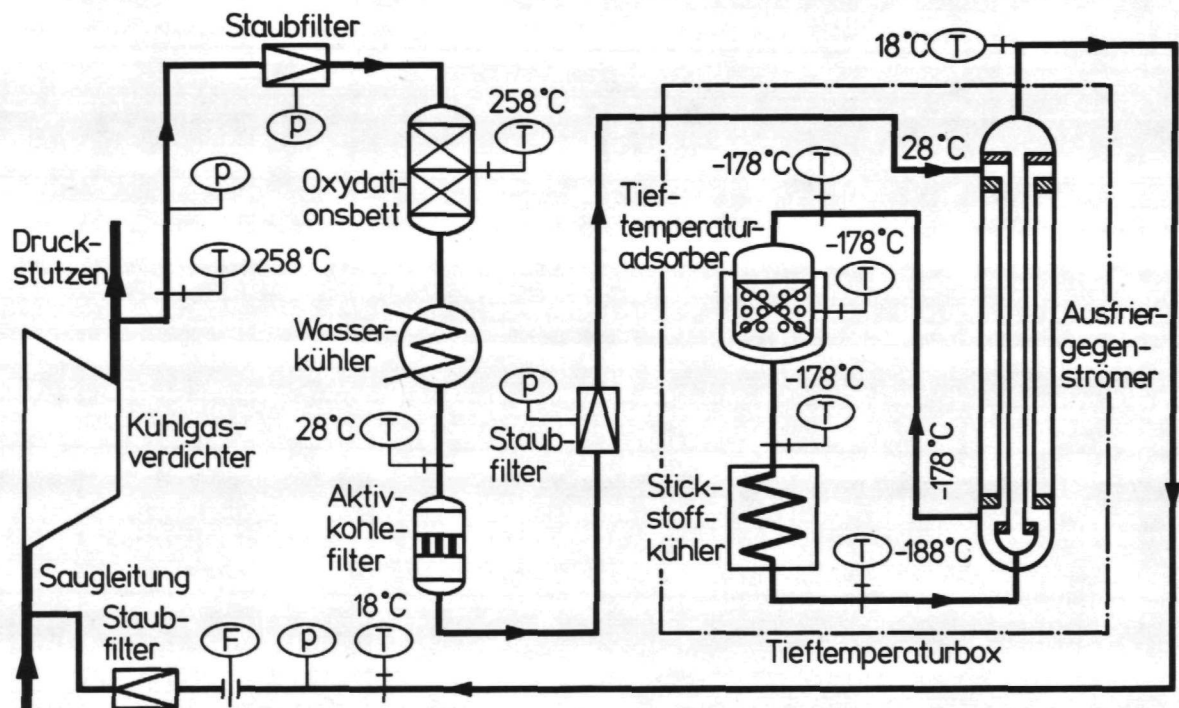


Abb. 27 Verfahrensschema der Heliumreinigungsanlage

Vom Kühlgasverdichter kommend tritt das Helium mit ca. 258°C über einen Staubfilter ins Oxydationsbett ein. Wird die Heliumreinigungsanlage vor Inbetriebnahme der HHV-Anlage zur Reinigung des Heliums in den Speichern gefahren, so erfolgt über eine elektrische Zusatzheizung eine Aufwärmung

des Heliums. Nach der Kompression werden im Oxydationsbett, das zwei Betten mit Kupfer und Kupferoxyd auf Trägermaterial enthält, H_2 und CO in H_2O und CO_2 umgesetzt. Zur Oxydation in Anwesenheit des Katalysators wird dabei der im Helium ebenfalls als Verunreinigung enthaltene Sauerstoff herangezogen. Ist kein Sauerstoff im zu reinigenden Gas enthalten, so wird der Kupferoxydkontakt verbraucht. Der Kontakt ist nach Erschöpfung durch Sauerstoffzugabe regenerierbar. Vor Eintritt in den Tieftemperaturteil der Gasreinigungsanlage wird das Helium nach dem Oxydationsbett im Wasserkühler abgekühlt und sodann über einen Aktivkohlefilter zur Adsorption von Öl, das mit dem Helium aus dem Kreislauf geführt wird, sowie ein nachgeschaltetes Staubfilter zur Aufnahme mitgeführten Kohlenstaubes geleitet.

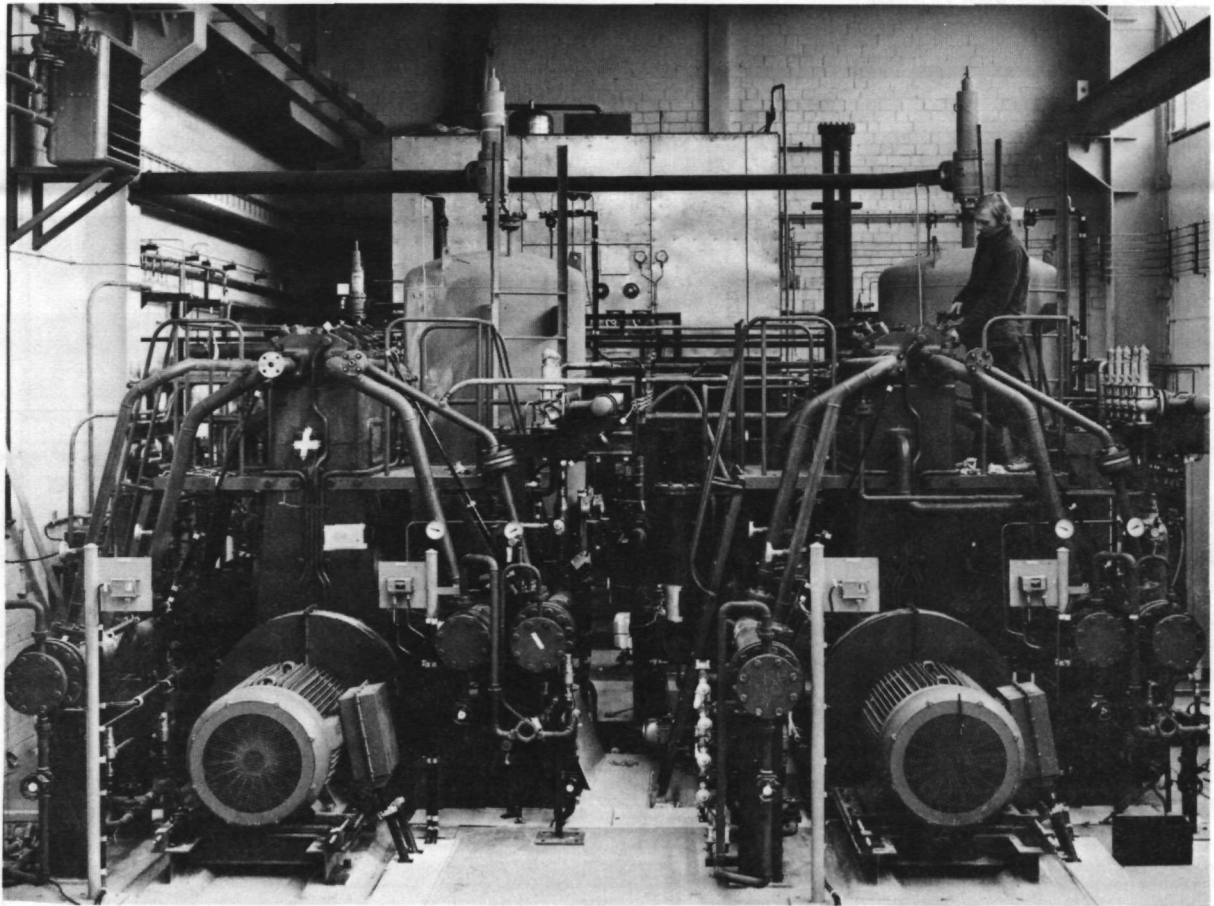


Abb. 28 Ansicht der Gasreinigungsanlage mit Heliumverdichtern im Vordergrund und Tieftemperaturanlage im Hintergrund

Der Tieftemperaturteil der Anlage besteht aus dem Ausfriergegenströmer, einem Stickstoffkühler und dem Tieftemperaturadsorber. Diese Anlagenteile

sind in einem gemeinsamen Behälter, der Tieftemperaturbox, eingebaut und entsprechend isoliert. Im Ausfriergegenströmer werden während der Abkühlung des Heliums im oberen Teil Wasser und im unteren Teil Kohlendioxyd ausgefroren. Danach tritt das Helium in den inneren Behälter des Tieftemperaturadsorbers, wo gasförmige Verunreinigungen wie Stickstoff, Argon und Methan von der Aktivkohle adsorbiert werden. Die Kälteversorgung der Anlage erfolgt über den Flüssigstickstoffkühler, der aus einem Tieftemperaturlagerbehälter mit flüssigem Stickstoff gespeist wird. Das über den Ausfriergegenströmer die Tieftemperaturbox verlassende gereinigte Helium wird über ein weiteres Staubfilter geleitet und in den Kreislauf zurückgeführt.

Die Wirksamkeit der Gasreinigungsanlage wird über einen Gaschromatographen und ein Feuchtemeßgerät überwacht. Entnahmemöglichkeiten zur Analyse befinden sich am Ein- und Austritt sowie an ausgewählten Zwischenstellen zur Kontrolle der Funktionstüchtigkeit der einzelnen Stufen der Gasreinigungsanlage. Die Reinheitsgrade, die mit der Gasreinigungsanlage in der HHV-Anlage zu erzielen sind, betragen für $H_2 < 5$ vpm, für O_2 , CO , CO_2 , Ar und CH_4 je < 1 vpm, für H_2O und N_2 je $< 0,5$ vpm und für $Ol < 0,1$ vpm.

4.2.8 Stromversorgung

Einen Überblick über die Prinzipschaltung der Elektro-Versorgungsanlage vermittelt Abb. 29. Die Versorgung erfolgt aus einer auf dem Gelände der KFA befindlichen 110-kV-Freiluftschaltanlage des RWE. Die Verbindung zwischen dieser Schaltanlage über einen 110-kV-Leistungsschalter für die HHV zu den beiden 30-MVA-Transformatoren erfolgt über eine 110-kV-Freileitung. Die beiden Transformatoren verfügen überspannungsseitig über Trennschalter und Erdungstrennschalter, die auf dem Abspanngerüst untergebracht sind. Freileitung und Transformatoren sind auf Abb. 4 vor dem HHV-Gebäude zu erkennen.

Die Transformatoren speisen über parallele Kabel in die 10-kV-Schaltanlage ein. Die Schaltanlage ist für 770-MVA-Abschaltleistung (Kurzschlußleistung) ausgelegt. Die Hohlleitersammelschienenanlage in gekapselter Zellenbauweise und mit herausfahrbaren Leistungsschaltern versorgt die drei 10-kV-Motoren und den 2-MVA-Trafo für den 380-V-Eigenbedarf. Von diesem Trafo wird in die 380/220-V-Schaltanlage eingespeist. Durch einen Längskuppelschalter ist

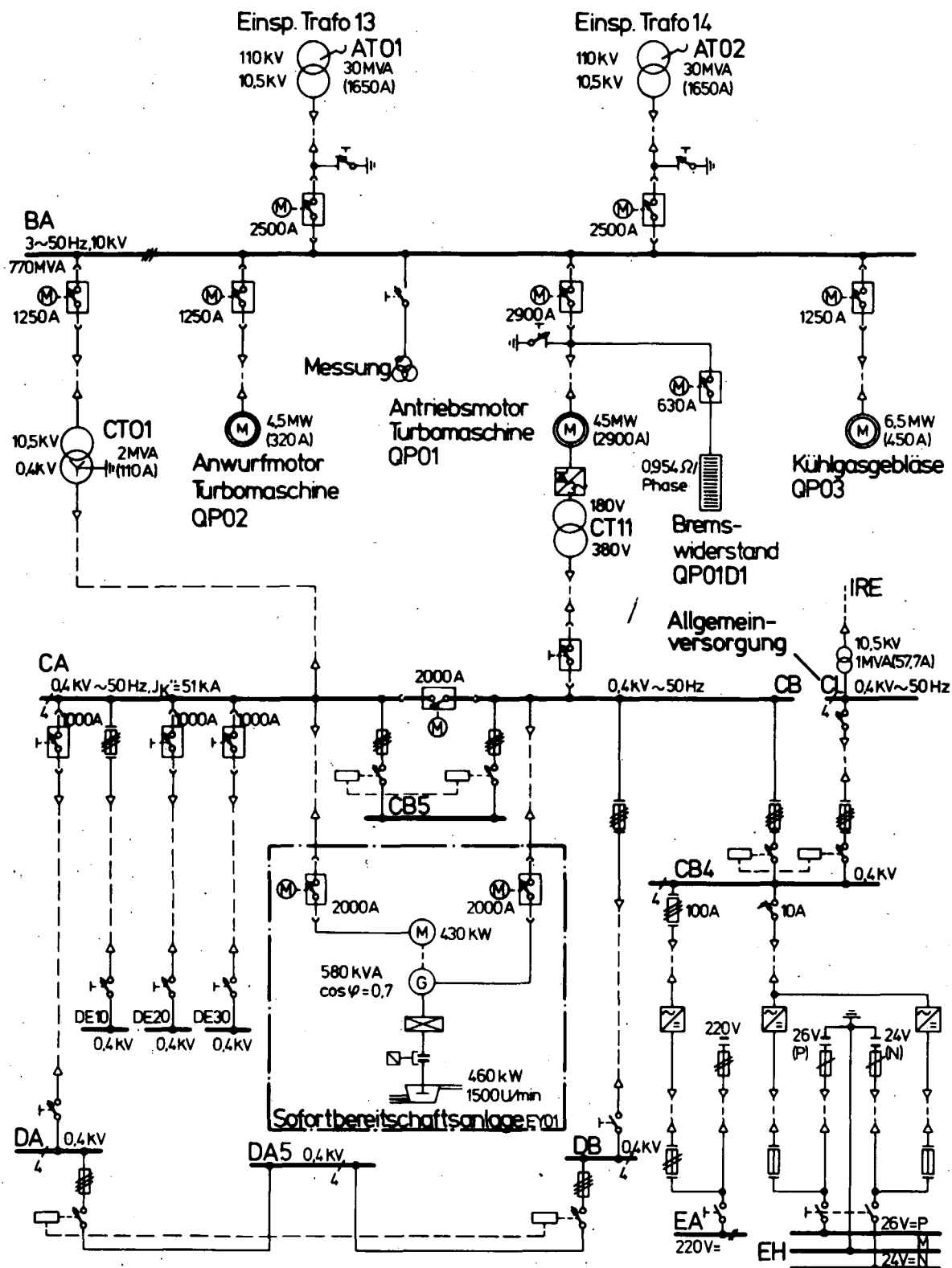


Abb. 29 Prinzipschaltplan für die Anlagenstromversorgung

diese Schaltanlage in zwei Abschnitte unterteilt. Der Abschnitt CB speist die Abnehmer, die auch bei Ausfall der 10-kV-Versorgung weiterversorgt werden müssen. Dafür ist ein 460-kW-Sofortbereitschaftsdiesel vorgesehen. Als wichtigste Abzweige sind die Erregung für den Synchronmotor und die Gleichrichteranlage für die Batterien in Abb. 29 eingezeichnet. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Art der an diese Schiene angeschlossenen Verbraucher und deren Anschluß.

Tabelle 2: Notstromberechtigte Verbraucher (Anschluß an die Sofortbereitschaftsanlage)

Verbraucher	Wirkleistungsbedarf in kW für Betrieb nach Störfalleintritt	
	von 0 bis 30 s	ab 30 s
Erregung Hauptmotor und Umwälz- pumpe für Bremswiderstand	ca. 200	-
Steuerspannung, Ölpumpen, Kühlwasserpumpen, Ventilation Sperrgaskühler, Stellantriebe und Notbeleuchtung	ca. 235	ca. 235
Ölpumpen, Kühlwasserpumpen, Kühlturmventilatoren, Gleichstromversorgung, Wellendrehvorrichtung, Druckluftversorgung und Hallenbelüftung	-	ca. 150
Summe	ca. 435	ca. 385

Die Sofortbereitschaftsanlage besteht aus einem 16-Zylinder-Viertakt-Dieselmotor mit Aufladung und 460-kW-Leistung bei 1500 min^{-1} , der über eine Elektromagnetkupplung mit einem Schwungrad verbunden ist, sowie einem Drehstrom-Synchronmotor und einem Drehstrom-Synchrongenerator. Während des normalen Anlagenbetriebes bei geöffneter Längskupplung der Schienen CA zu CB treibt der Motor den Generator und das Schwungrad. Im Notstromfall erfolgt die Kupplung mit dem Diesel und der Start des Diesels aus der Schwungradenergie des rotierenden Schwungrades.

Die 220-V-Gleichspannung liefert ein Gleichrichter mit gepufferter Batterie. Angeschlossen hieran sind im wesentlichen Schutzeinrichtungen, Steuerstromkreise, die Notbeleuchtung sowie über GS/DS-Umformer die Rechnerversorgung. In gleicher Weise ist die $\pm 24\text{-V}$ -Gleichspannung für die Meß- und Regelanlage aufgebaut.

Ebenfalls in Abb. 29 eingezeichnet ist die Allgemeinversorgung für die Gebäude mit ihren betriebstechnischen Einrichtungen. Eingespeist wird hier auf der 10-kV-Seite durch eine gesonderte Leitung aus der KFA. Für die Hausversorgung steht ein 1-MVA-Transformator zur Verfügung.

4.2.9 Meß-, Regel- und Steuerungstechnik

Die Prozeßführung der Anlage erfolgt von der zentralen Warte aus, siehe Abb. 30. Durch eine Fensterreihe hinter dem Wartepult besteht von hier aus Sichtkontrolle mit der Anlage. Auf dem Pult und der ebenfalls auf dem Foto sichtbaren Tafel befinden sich Anzeiger-, Schreiber- und Meldefelder. Diese konventionellen Meßwertausgabeeinrichtungen werden zusammen mit den Prozeßeingriffselementen für die Regelungen und Steuerungen benötigt. Zusätzlich ist eine Prozeßrechenanlage vorhanden, auf die noch in Abschnitt 4.2.10 näher eingegangen wird. Der Rechner wird jedoch nicht direkt zur Prozeßsteuerung herangezogen und der Weiterbetrieb der Anlage ist z.B. auch bei einem eventuellen Ausfall der Prozeßrechenanlage während des Betriebes möglich.

In der Tabelle 3 ist die Zuordnung der Meßstellen zu den Komponenten der Anlage dargestellt. Analoge und digitale Meßsignale fallen im wesentlichen an für Temperatur, Druck, Durchfluß, Füllstand, Drehzahl, Schwingung, Deh-



Abb. 30 Blick in den Wartenraum mit Wartenpult während der Montage

nung, Stellungsanzeigen und elektrische Meßgrößen. Je nach Weiterverwendung der Meßsignale erfolgt die Meßwerterfassung über Meßgrößenumformer mit einem normierten Ausgangssignal 4 - 20 mA oder aber bei Temperaturmessungen über Thermospannungen direkt. Die Schwingungsmessung am Kühlgasverdichter und an der Turbomaschine erfolgt u.a. auch über ein Ortskurvenbild. Die Temperaturen am Verdichteraustritt werden auf unzulässige Temperaturgradienten überwacht. Für Schutzeinrichtungen werden diese Meßwerte mit einer 2 von 3-Auswahlschaltung überwacht.

Für die zahlreichen Regelungen werden elektronische Kompakt-Regler eingesetzt, die die pneumatischen Stellglieder über IP-Wandler ansteuern. In drei speziellen Fällen werden örtliche pneumatische Regelungen eingesetzt. Die Steuerung ist in einer verbindungsprogrammierten Relastechnik ausgeführt. Für die Überwachung von Analogsignalen sind 160 elektronische Grenz-

signalgeber eingesetzt. Eine Gefahrmeldeeinrichtung für 140 Meldungen ist parallel zum Prozeßrechner in Betrieb.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Betriebsmeßsignale für die Prozeßführung
(ohne die Versuchszusatzinstrumentierung)

Bauteil bzw. Baugruppe	Tempe- ratur	Druck	Durch- fluß	Stellung	Drehzahl Schwin- gung	Füllstand u. Son- stige	Gesamt
Turboma- schine	83	9	-	-	4	-	96
Heißgas- u. Hilfsgas- leitungen	68	34	21	39	4	1	167
Ölsysteme	46	48	6	-	-	14	114
Rückkühl- anlage	119	19	26	6	-	9	179
Getriebe u. Motore	77	-	-	1	-	1	79
Elektro- versorgung	-	-	-	-	-	22	22
Gesamtan- lage	393	110	53	46	8	47	657

4.2.10 Datenerfassung

Neben der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Meßtechnik stehen für die Erfassung der aus dem Anlagenbetrieb gewinnbaren Daten zwei Datenerfassungssysteme zur Verfügung. Dabei handelt es sich einmal um eine Prozeßrechenanlage und zum anderen um eine Datenerfassungsanlage, auf der die im Bereich der Teststrecke anfallenden Versuchsdaten gesammelt werden.

Die Prozeßrechenanlage hat die Aufgaben: Datenerfassung, Datenüberwachung und Datenverarbeitung. Die Datenerfassung umfaßt 354 zyklische Analogwerte

und 228 spontane Digitalwerte, die zu verarbeiten sind, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Belegung der Prozeßrechenanlage

Bauteil bzw. Baugruppe	Eingangssignale für PRA		
	analog	digital	Gesamt
Turbomaschine	93	43	136
Heißgas- und Hilfgas- leitungen	113	44	157
Ölsysteme	30	59	89
Rückkühlanlage	60	14	74
Getriebe und Motore	54	44	98
Elektroversorgung	4	21	25
Steuerluftanlage	-	3	3
Summe	354	228	582

Die Anlage hat 384 mögliche Analog- und 264 mögliche Digitaleingänge. Dabei schließt die Analogwerterfassung die Driftkorrektur, eine Kennlinienkorrektur, Dämpfung, Brückung und die Softwareanalogwertbildung ein. Die Digitalwerte werden der Prozeßrechenanlage spontan gemeldet. Bei der Datenüberwachung werden die analogen Meßwerte auf Plausibilität und drei technologische Grenzen überprüft. Bei der letzten Stufe der Datenverarbeitung werden die Meßwerte nach verfahrens- und betriebstechnischen Gesichtspunkten sortiert und gespeichert, um eine spontane, zyklische oder auf Abruf erfolgende Ausgabe von Daten zu ermöglichen. Für die Kennwertberechnung, wie z.B. die Ermittlung der Massenströme in den Gaskreisläufen, erfolgt bei der Analogwertverarbeitung eine Mittelwertbildung. Die erfaßten Analogwerte werden im System bereitgestellt für die Störungsablaufprotokolle, von denen es vier gibt, für die Langzeitspeicherung auf dem Magnetband, für die 15 Meßwertfolge-

protokolle und die Betriebswerteprotokolle. Die Digitalwerte gehen ein in das Betriebsablaufprotokoll, die Betriebsablaufanzeige und als Auslösekriterien in das Störungsablaufprotokoll. Für die Ausgabe dieser Protokolle stehen in der Warte drei Protokollschreibmaschinen zur Verfügung. Von diesen erfaßt die erste das Störungsablaufprotokoll, die zweite das Betriebsablaufprotokoll, während auf der dritten das Meßwertfolgeprotokoll mit höherer Priorität gegenüber dem ebenfalls auf dieser Maschine erfaßten Betriebswerteprotokoll registriert ist.

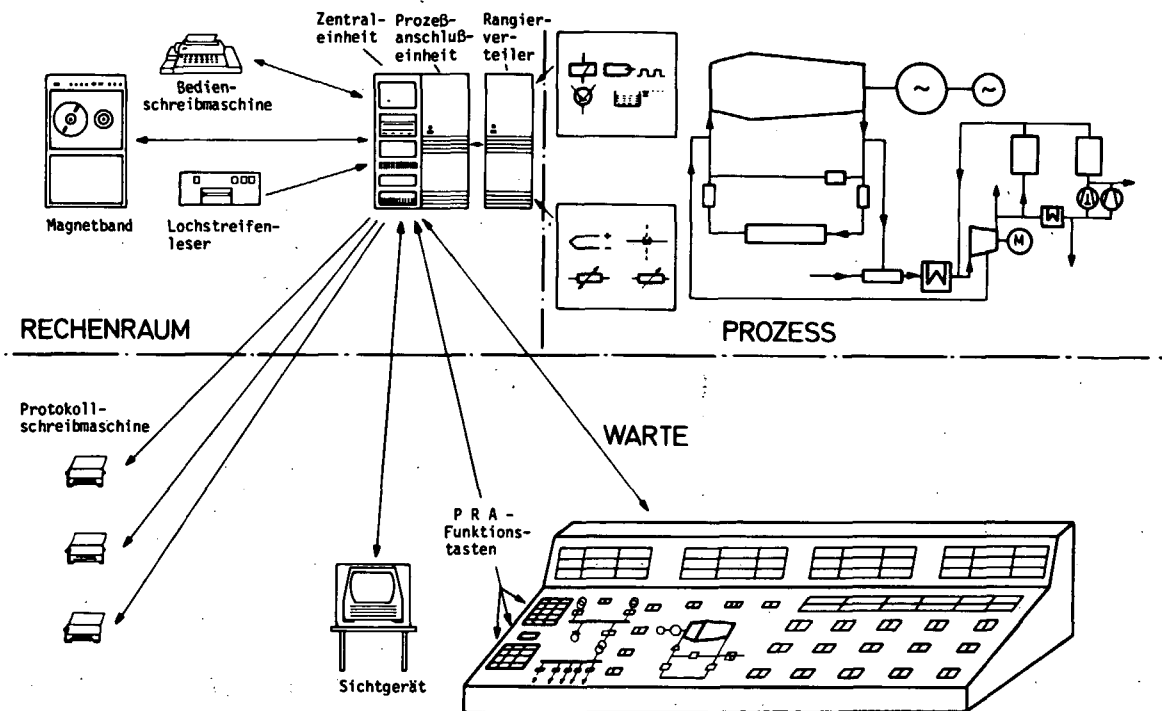


Abb. 31 Übersichtsplan über die Einzelkomponenten der Prozeßrechenanlage

Die Kommunikation Mensch - Rechner geschieht über das Sichtgerät und die Funktionstastatur, die sich im Wartepult befindet. Programmänderungen und das Einlesen von Programmen oder Testroutinen werden über die Bedienschreibmaschine vorgenommen. Zusätzlich ist sichergestellt, daß alle analogen Meßwerte und Betriebskennwerte in regelmäßigen Abständen von 10 Minuten zur späteren Auswertung des Versuchsbetriebes auf dem Magnetband abgespeichert werden. Darüber hinaus wird bei der Langzeitüberwachung dann auf Magnetband

abgespeichert, wenn ein Analogwert eine eingegebene Grenze überschreitet. Damit wird sichergestellt, daß auch Störungen im Gesamtsystem bei der Meßwerterfassung sicher berücksichtigt werden und eine spätere Interpretation möglich ist.

Auf Abb. 31 sind die einzelnen Komponenten der Prozeßrechenanlage schematisch dargestellt. Die Prozeßanschlußeinheit ist über den Rangierverteiler mit dem Prozeß, der ebenfalls schematisch in dieses Bild aufgenommen ist, verbunden. Prozeßanschlußeinheit, Zentraleinheit, Magnetband, Lochstreifenleser und Bedienschreibmaschine sind im Wartennebenraum untergebracht, der auch als Rechnerraum bezeichnet wird, während in der Warte sich die Funktionstasten auf dem Wartepult sowie das Sichtgerät und die drei Protokollschreibmaschinen neben dem Wartepult befinden. Abb. 32 zeigt eine Ansicht der im Wartennebenraum aufgestellten Prozeßrechenanlage.

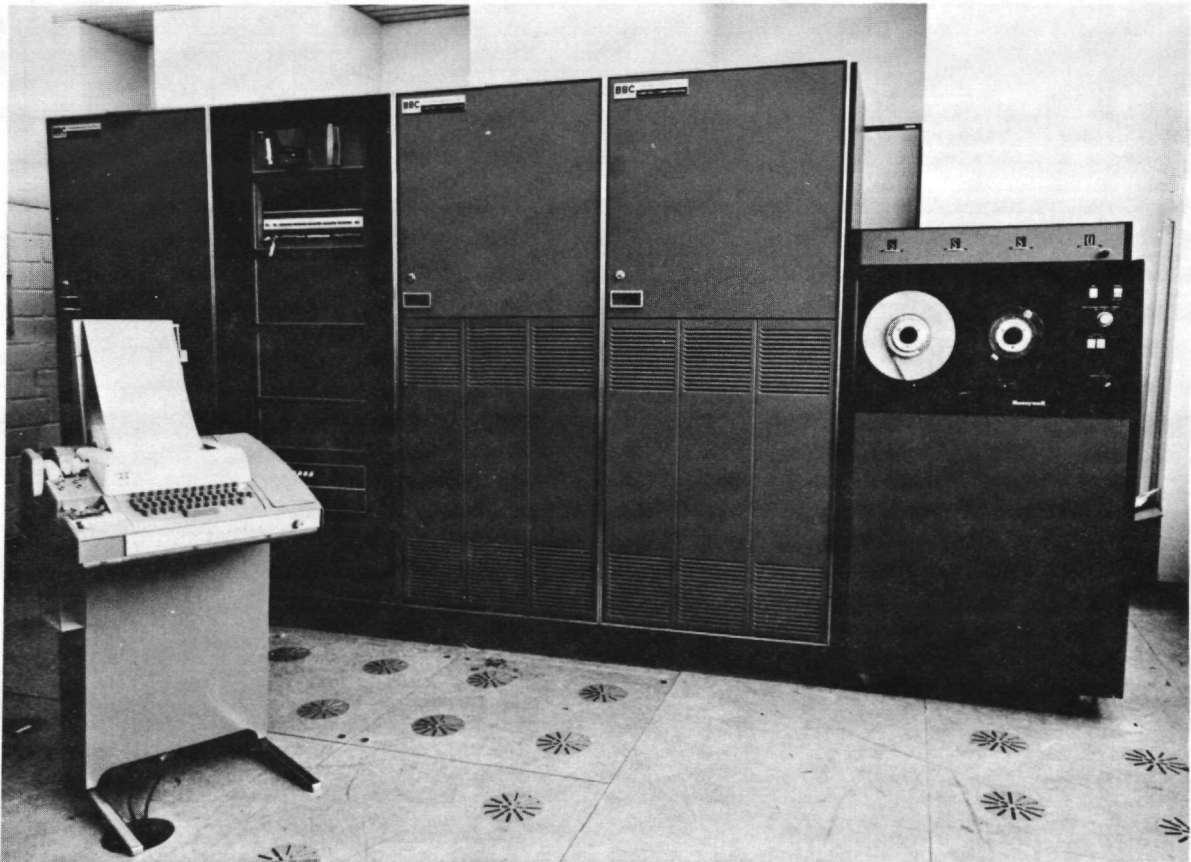


Abb. 32 Ansicht der im Wartennebenraum aufgestellten Prozeßrechenanlage

Die Datenerfassungsanlage für die Versuche an der HHV-Anlage wird neben dem Prozeßrechner benötigt, um die Versuchsdaten, die in der ersten Ausbaustufe der Anlage im wesentlichen im Bereich der Heißgasleitung anfallen, zu erfassen. Das System ist mit 430 Analog- und 48 Digitaleingängen ausgestattet und so konzipiert, daß eine Erweiterung der Eingänge auch auf die Bedürfnisse umfangreicher Komponentenuntersuchungen in der HHV-Anlage ohne Schwierigkeiten möglich ist.

Um leicht an die sich verändernden Versuchsbedingungen in der HHV anpaßbar zu sein, wird die Datenerfassungsperipherie, bestehend aus dem Meßstellenumschalter, dem Analogdigitalwandler und der Steuereinheit, in der HHV-Halle aufgestellt, wie dies aus dem Prinzipschaltbild entsprechend Abb. 33 ersichtlich ist. Die Zentraleinheit der Versuchsrechenanlage mit dem Plattenspeicher, dem Bandgerät, den Bedienungs- und den Anschlußgeräten wird wie die Prozeßrechenanlage im Wartennebenraum aufgestellt.

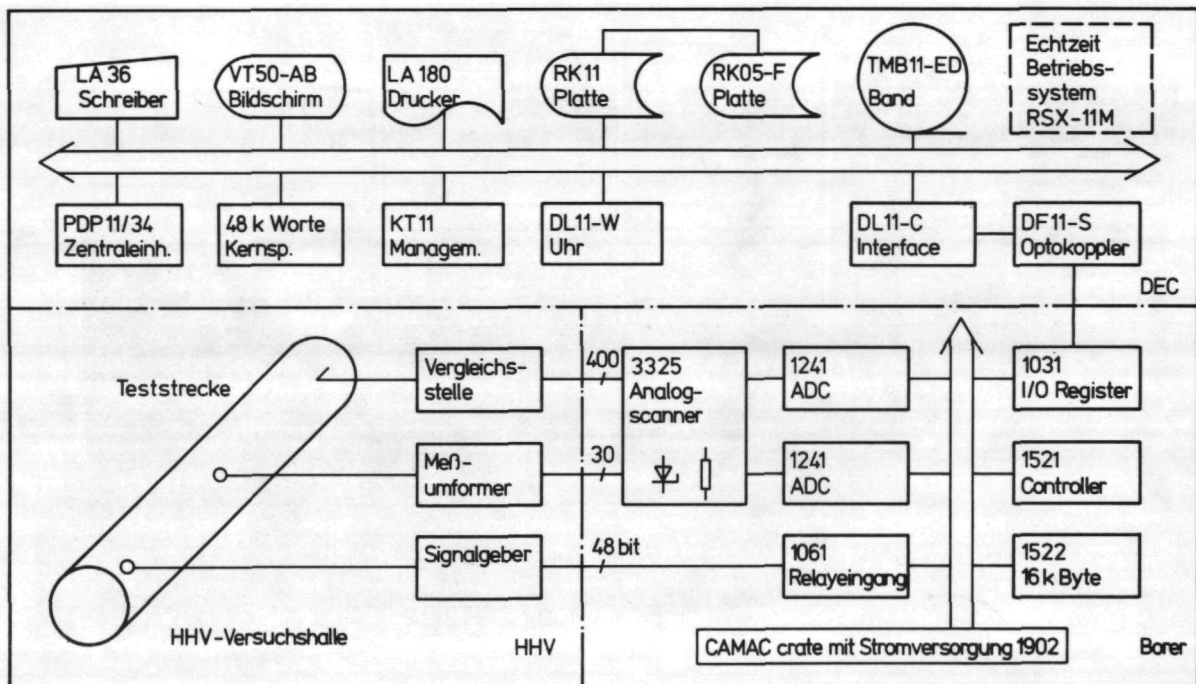


Abb. 33 Prinzipschaltbild der Datenerfassungsanlage für die Versuche an der HHV

Als Betriebssystem des Rechners wird ein Echtzeitmehrbenutzerbetriebssystem eingesetzt, welches den versuchsführenden Partnern eine gleichzeitige Durch-

führung der Versuche ermöglicht und die Programmierung in einer allgemeinen Programmiersprache, wie z.B. FORTRAN, gestattet. Die Datenerfassungsperipherie ist in einem CAMAC-System aufgebaut und wird durch eine programmierbare Steuereinheit an das Betriebssystem des Rechners angepaßt, siehe Abb. 33.

4.3 Gebäude mit Versorgungseinrichtungen

Die Anordnung des HHV-Gebäudes einschließlich aller Nebenanlagen ist aus Abb. 3 ersichtlich. Das Gebäude ist ein in sich geschlossener Komplex und gliedert sich im wesentlichen in die Versuchshalle, den Anbau für die Elektroversorgungsanlage mit der Warte und den Anbau für die Heliumreinigungs- und Heliumversorgungsanlage. Das Gebäude ist als Stahlkonstruktion ausgeführt, wie dies aus Abb. 34, einer Aufnahme während der Bauzeit, deutlich zu erkennen ist.

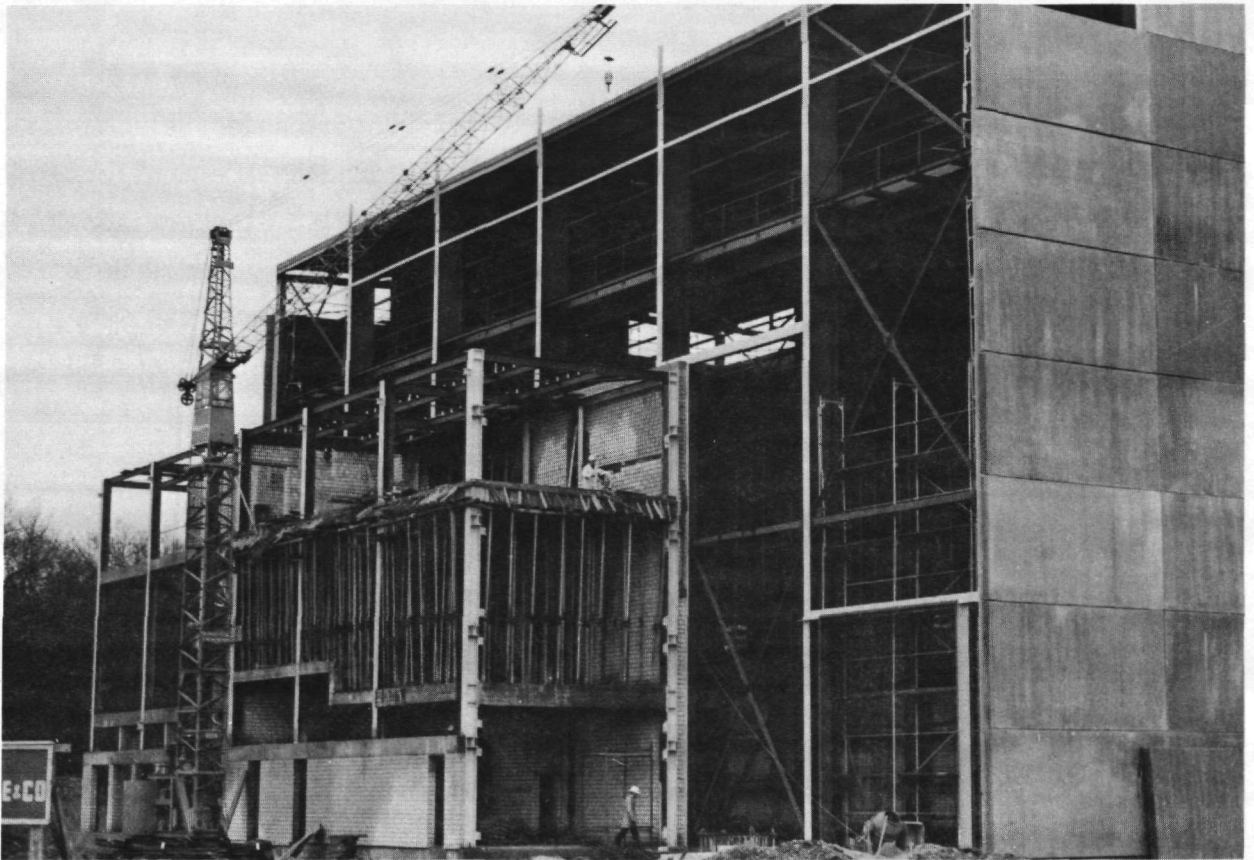


Abb. 34 Aufnahme des HHV-Gebäudes während der Bauzeit

Vor diese Stahlkonstruktion sind von außen vorgefertigte schalldämmende Leichtbetonplatten gehängt. Die HHV-Halle ist fensterlos ausgeführt, um die erforderliche Schalldämmung zu erreichen, die für das nächst liegende Gebäude einen Schallpegel von 60 dB (A) nicht überschreiten darf.

Innerhalb der HHV-Halle sind auf einzelnen Stahlbetonfundamenten die Tischfundamente für die Turbomaschine und das Kühlgasgebläse einschließlich der Antriebsmotoren sowie die Abstützungen für die Heißgasleitung montiert. Unterhalb des Hallenbodens befinden sich an den wesentlichsten Stellen begehbare Kabel- und Rohrschächte. Ein Verbindungskanal führt bis ins Pumpenhaus.

In dem vor der nordöstlichen Gebäudelängswand angeordneten Anbau ist in mehreren Geschossen die gesamte Elektroversorgungsanlage untergebracht. Ebenso sind hier aufgestellt der Sofortbereitschaftsdiesel, die Heizzentrale, die Klimaanlage für den Wartenbereich sowie im Obergeschoß die Warte einschließlich des Wartennebenraumes sowie Sanitärräume und ein Aufenthaltsraum. Die drei Geschosse des Anbaus sind durch ein Treppenhaus verbunden.

Auf der gegenüberliegenden Seite der HHV-Halle befindet sich der Heliumanbau, in dem die gesamte Heliumversorgungs- und -reinigungsanlage montiert ist. Ein Teil dieses Anbaus ist lediglich überdacht und ist Standort für die Heliumdruckspeicher. Oberhalb der Heliumreinigungsanlage ist die Belüftungsanlage für die Halle untergebracht. Diese ist so ausgelegt, daß während des Anlagenbetriebes ca. 800 kW Wärmeleistung abgeführt werden können. Für die kalte Jahreszeit ist die Lüftungsanlage außerdem mit einem Heizregister ausgerüstet.

Das HHV-Gebäude enthält keine Werkstatt und keine Büroräume. Von der ansonsten üblichen Ausrüstung sind der 80/16-Mp-Hallenkran sowie der 15-Mp-Brückenkran im Heliumanbau zu erwähnen.

5. Versuchsvorhaben und Versuchsmöglichkeiten

In diesem Bericht wurden bereits kurz die Aufgabenstellungen für die Anlage erläutert. So soll die Anlage in erster Linie der Erprobung von Kreislauf-

komponenten für HHT-Anlagen sowie dem Nachweis der Funktionstüchtigkeit und Betriebssicherheit der HHV-Turbomaschine und damit Demonstration der Anwendbarkeit bekannter Technologien auf den Bau von Heliumturbinen großer Leistung dienen. Die Neuorientierung bei der Hochtemperaturreaktorentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland ist gekennzeichnet durch die Zielrichtung, nach einer zeitlich relativ begrenzten Konzeptfindungsphase nur noch eine Entwicklungsrichtung für eine stromerzeugende HTR-Anlage weiter zu verfolgen, außerdem auf diesem Konzept aufbauend auch die Prozeßwärme erzeugende HTR-Anlage zu entwickeln. Bisherige Planungen für die HHV sahen vor, die Anlage ab Fertigstellung im Frühjahr 1977 zunächst zur Erprobung des Kreislaufes zu betreiben und anschließend Prototypkomponenten einer HHT-Anlage zu testen. Der erste Schritt nach der Inbetriebnahme der Anlage kann nach wie vor durchgeführt werden. Für den Einsatz von großen Testkomponenten fehlt zur Zeit noch die Basis, da Aussagen zur Konstruktion der zu testenden Komponenten erst nach Fertigstellung eines Anlagenkonzeptes erwartet werden können.

Die Untersuchungen an der Anlage in dem Umfang, wie er der Beschreibung in diesem Bericht zugrunde liegt, konzentrieren sich insbesondere auf die Turbomaschine und die Heißgasleitung, also die Teile des Kreislaufs, die mit der vollen Heißgastemperatur beaufschlagt werden. Auf die hier vorgesehenen Untersuchungen soll jedoch nur beispielhaft eingegangen werden, wobei auf /5/ und /6/ verwiesen wird.

Ein Untersuchungsvorhaben bei der Turbomaschine konzentriert sich auf das geschlossene Kühlgassystem zur Kühlung der Schaufelfüße von Rotor und Stator. Durch eine Thermoelementbestückung sowohl im Rotor- als auch im Statorbereich und die gleichzeitige kalorische Erfassung der Kühlgasströme wird es möglich, Aussagen über die Temperaturverteilung und die Wirksamkeit der Kühlung an einer erstmalig thermisch so hoch beanspruchten Helium-Maschine im Kreislauf zu studieren. Dabei wird auch den dabei auftretenden Druckverlusten im Kühlgassystem meßtechnisch Rücksicht getragen. Auf der Heißgasseite ist es möglich, bei entsprechenden Druck- und Temperaturmeßstellen Aussagen über die Strömungscharakteristik der Turbomaschinenbeschaufelung zu gewinnen. Die Abb. 35 vermittelt einen Überblick über die an der Turbomaschine vorgesehenen Untersuchungen.

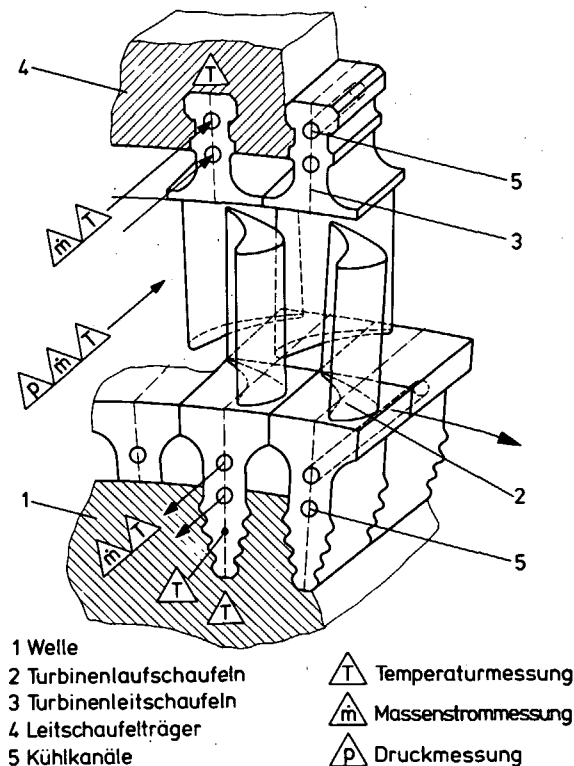


Abb. 35 Untersuchungen an der Turbomaschine

Die Fragen der Heliumdichtigkeit stehen beim Gesamtkreislauf im Vordergrund. Zu dem bei der HHV-Turbomaschine eingesetzten Wellendichtungssystem mit einer 3-Kammer-Schwimmring- und Stillstandsichtung erfolgten in einem gesonderten Prüfstand Voruntersuchungen. Diese sollen durch Messungen an der Wellendichtung der Turbomaschine erstmalig an einer ausgeführten Maschine bestätigt werden. Zusätzlich zur Schwingungsüberwachung für den Betrieb der Maschine wurden in verschiedenen Meßebenen Schwingungsaufnehmer ergänzt, um so eine dynamische Überwachung des Rotors zur Erprobung eines Rechenprogramms zur Bestimmung des stationären Läuferverhaltens zu ermöglichen. Außerdem ist vorgesehen, die Schallerzeugung der Turbomaschinenbeschaufelung und die Schallfortpflanzung sowie ihren Einfluß auf die Heißgasleitung durch Messung der Gasschwingungen und der Schwingungen des Innenliners der Heißgasleitung zu erfassen.

Die im Bereich der Heißgasleitung vorgesehenen Messungen sind in Abb. 36 skizziert. Hinsichtlich der vorgesehenen Messungen an der Positionen 13 und 14 der HHV-Heißgasleitung wird auf /10/ verwiesen, jedoch sind in der Heißgasleitung nicht nur in den dort beschriebenen beiden Positionen zusätzliche

Meßstellen eingebaut, sondern in ebenfalls drei weiteren Teststrecken. So wird es möglich, Temperaturprofile und örtliche Wärmeverluste auch in einem normalen Krümmer sowie einem aus Krümmer und geradem Rohrleitungsstück bestehenden Koaxialleitungselement der Heißgasleitung zu messen. Außerdem sind globale Untersuchungen zu den Wärmeverlusten der gesamten Heißgasleitung vorgesehen. An einer der drei in der Heißgasleitung zu Regelzwecken vorgesehenen Heißgasklappen mit Gaskühlung sind Messungen zum Kühlverhalten mit Ermittlung des Temperaturprofils in der Klappenwelle beabsichtigt. Zusätzlich sollen insbesondere die Schließ- bzw. Öffnungsvorgänge durch Schwingungs- und Drehmomentmessungen überwacht werden.

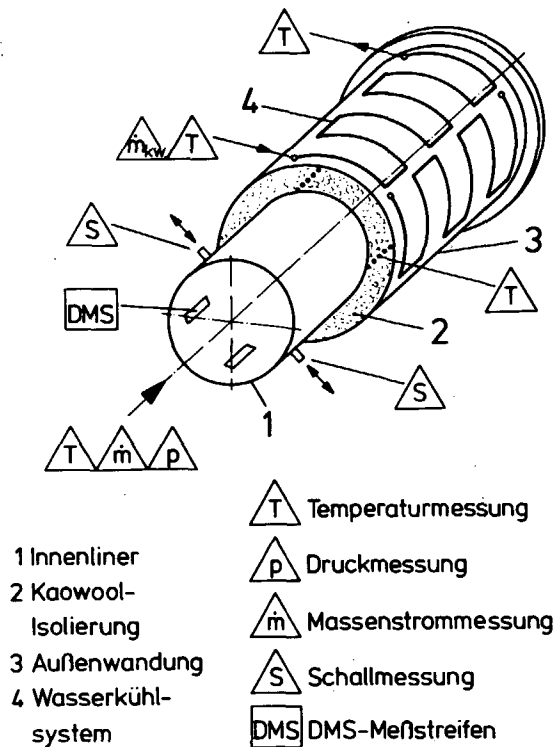


Abb. 36 Prinzipielle Untersuchungen an der Heißgasleitung

Kurz erwähnt wurden in diesem Zusammenhang nur die wesentlichsten Versuchsvorhaben im heißen Bereich der Anlage. Ergänzt werden diese durch Untersuchungsvorhaben auch an anderen Stellen des Kreislaufs, die während der Messungen an der Turbomaschine und der Heißgasleitung durchgeführt werden können. Maßgebend für die Programmgestaltung sind jedoch die vorgesehenen Untersuchungen im Bereich der Heißgasleitung und der Turbomaschine. Dabei ist vorgesehen, eine Variation der Größen Gastemperatur, Gasdruck, relativer Druckab-

fall und Massenstrom in der Teststrecke durchzuführen. In der nachfolgenden Tabelle 5 wird ein tabellarischer Überblick über die für die Phase IB des HHT-Projektes vorgesehenen Versuchsvorhaben gegeben.

Tabelle 5: Untersuchungsvorhaben an der HHV im ersten Ausbaustadium

Vorhaben	Zweck und erwartete Aussage des Vorhabens
<u>Turbomaschine</u>	
Problemkreis: Beschaufelungskanal Maschinenkühlung	Wesentliche Untersuchungen an der Turbomaschine, da hier der Nachweis der Funktionstüchtigkeit der im Prinzip aus dem offenen Gasturbinenbau übernommenen Technik zu erbringen ist. Gewinnen von auf HHT-Turbinen übertragbaren Detailergebnissen.
Problemkreis: Wellenabdichtung Anlagendichtigkeit	Wesentliche Untersuchungen zur Absicherung der Erkenntnisse aus dem BBC-Wellendichtungsprüfstand an einer ausgeführten Maschine. Untersuchungen auf He-Dichtigkeit am Gesamtsystem (insbesondere Trennfuge der Maschine).
Problemkreis: Betriebsverhalten	Nachweis der Gewährleistungs- und Auslegungsdaten. Wesentliche Aussagen zur Betriebsfähigkeit der HHV-Anlage und speziell der Turbomaschine mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit und Betriebssicherheit der Turbomaschine und damit Demonstration der Anwendbarkeit bekannter Technologien auf den Bau von Heliumturbinen großer Leistung und Aussagen zum Betriebsverhalten über längere Betriebszeiten.
Problemkreis: Dynamisches Verhalten	Absicherung eines entwickelten Rechenprogrammes über das Rotorschwingungsverhalten im stationären und instationären Betrieb.
Problemkreis: Montage, Inspektion und Revision	Zusammenfassung der während der Errichtung, Inbetriebsetzung und Revision gewonnen Erfahrungen.
<u>Heißgasleitung</u>	
Problemkreis: Thermisches Verhalten, Isolationsuntersuchungen	Wesentliche Untersuchungen zur Bestätigung und Ergänzung von umfangreichen Voruntersuchungen an verschiedenen Isolationsformen und Erprobung einer weitgehend HHT-Verhältnissen angepaßten Koaxleitung.
Problemkreis: Dehnungen und elastisches Verhalten	Gewinnung von Aussagen für thermisch hoch belastbare Rohrleitungssysteme mit Innenisolierung unter Betriebsbedingungen

Vorhaben	Zweck und erwartete Aussage des Vorhabens
Problemkreis: Schallschwingungen	Ergebnisse sind im Zusammenhang mit den Messungen an der Turbomaschine zu sehen. Sie sollen Bewertungsmaßstäbe geben für die optimale Auslegung der Strukturmaterialien der Heißgasleitung einer HHT-Anlage.
Problemkreis: Armaturen	Versuchsergebnisse liefern für einige Bereiche Aussagen, die in das HHT-Projekt einfließen, so insbesondere Aussagen zum Temperaturverlauf in der Klappenwelle, zur Dichtigkeit an den Drehdurchführungen, zu den Druckverlusten sowie zum mechanischen Verhalten.
<u>Nebensysteme</u>	
Problemkreis: Kühler	Aussagen zum Verhalten des Hauptgaskühlers (thermisches Verhalten, Regelverhalten) werden erwartet.
Problemkreis: Heliumversorgungs- und -reinigungs- anlage	Absicherung der Auslegungsdaten im stationären und instationären Betrieb. Messungen der Kreislaufverunreinigungen lassen Rückschlüsse auf bestimmte Kreislaufkomponenten, wie z.B. die Dichtölssysteme, zu, die direkt auf HHT-Turbomaschinen übertragbar sind.

Es wurde bereits betont, daß die in der Tabelle zusammengestellten Versuchsvorhaben lediglich die Untersuchungen an der HHV in der ersten Ausbaustufe, d.h., der Ausbaustufe, die der Beschreibung dieses Berichtes zugrunde liegt, erwähnen, während Nachfolgeuntersuchungen die eigentlichen Testkomponenten betreffen, die aus den vorher erläuterten Gründen ausgespart bleiben. Soweit dies jedoch noch nicht erfolgt ist, soll noch einmal das Potential der Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage für derartige Versuchsvorhaben herausgestellt werden. Vom thermodynamisch strömungstechnischen Standpunkt wird dieses Potential durch die Angaben in Abb. 37 umschrieben. Mit Turbomaschine und Kühlgasgebläse wird Helium im System umgewälzt. Betrachten wir einen sogenannten Testbereich, so steht in diesem Heißgas und Kühlgas unter den angegebenen Bedingungen zur Verfügung. Wesentliche Auslegungsgrößen sind dabei Gasdruck, Gastemperatur und Massenstrom sowie nutzbares Druckgefälle. Aus den genannten Daten wurden zwei wesentliche herausgegriffen und in der rechten Seite von Abb. 37 hinsichtlich ihres Zusammenhangs dargestellt. Dabei handelt es sich um die Abhängigkeit des Gasdruckes im System von der Heißgastemperatur. Der sichtbar umrandete Bereich stellt den erwarteten

Versuchsbereich mit der HHV-Anlage dar.

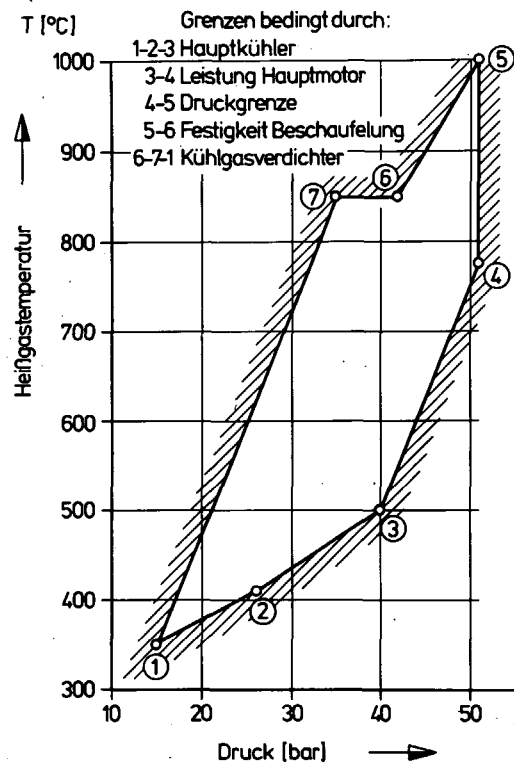
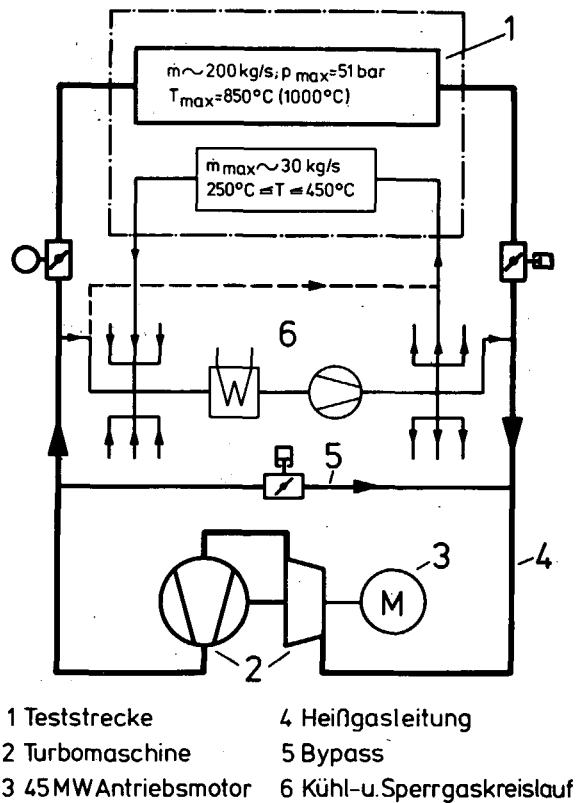


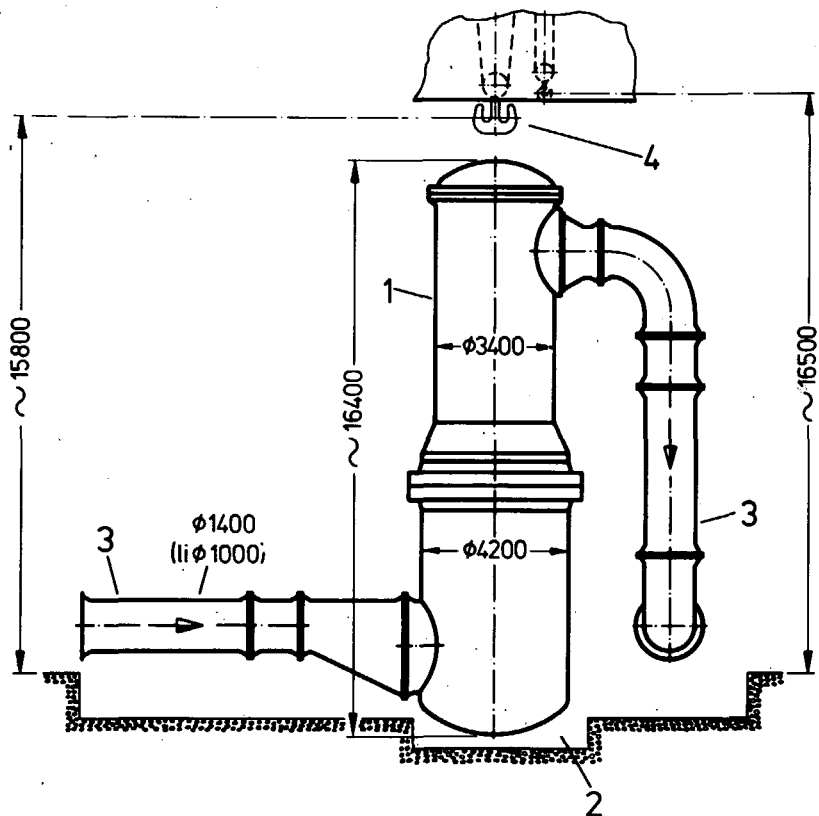
Abb. 37 Prinzipschaltbild der Anlage mit erwartetem Betriebsdiagramm

Eingetragen sind Grenzpunkte von 1 - 7, bedingt durch technologische Grenzen der Anlage, die Leistungsgrenze des Hauptkühlers, des Hauptmotors, des Kühlgasverdichters sowie der Druck- und Temperaturgrenze des Systems. Zur klareren Darstellung wurden die in der Tabelle 6 aufgeführten Größen nicht übernommen und der dargestellte Betriebsbereich auf eine relative Druckdifferenz von etwa 3 % im Heißgaskreislauf bezogen.

Eine weitere wesentliche Frage für den Einsatz von Testkomponenten in die HHV-Anlage ist die der möglichen Größe derartiger Komponenten. Um hier eine universelle Versuchsmöglichkeit zu schaffen, wurde die Heißgasleitung aus einzelnen Schüssen zusammengesetzt. Dies ermöglicht im Bereich der Teststreckengrube den Einsatz von Versuchskomponenten unterschiedlicher Abmessungen. Die zur Verfügung stehenden räumlichen Abmessungen mit den gegebenen Anschlußverhältnissen werden in Abb. 38 am Beispiel eines Teststreckenbehälters erläutert, wie er für den Test einer kompletten Heißgasleitung der 3 x 360-MW-HHT-Anlage entworfen wurde.

Tabelle 6: Thermodynamisch strömungstechnische Daten in der Teststrecke

Wesentliche Versuchsparameter		Bereich	Auslegungspunkt
Heißgasstrom für Teststrecke			
Massenstrom	\dot{m} kg/s	bis 201	201
Temperatur	T °C	von 350 bis 1000	850
Druck	p bar	von 15 bis 51,2	51,2
relativer Druckabfall	$\Delta p/p$	von 0,01 bis 0,04	0,03
Kühlgasstrom für Teststrecke			
Massenstrom	\dot{m} kg/s	bis 31	22,9
Temperatur	T °C	von 250 bis 450	300



1 Teststreckenbehälter

3 Heißgasleitung

2 Teststreckengrube

4 Hallenkran (80 Mp)

Abb. 38 Räumliche Einbauverhältnisse mit Vorschlag für die Anordnung eines Teststreckenbehälters

Neben dem hier umrissenen Potential dieser in mancher Hinsicht einmaligen Versuchsanlage für Komponententests unter weitgehend realistischen Erprobungsbedingungen sollen auch die technologischen Gegebenheiten aufgezeigt werden, die eine Begrenzung für die Versuchsmöglichkeiten in der Anlage bedingen. Einmal sind in diesem Zusammenhang die Betriebskosten zu nennen, die im wesentlichen bestimmt werden durch den elektrischen Energieverbrauch der Anlage. Ferner wurde bei der Darstellung des möglichen Parameterfeldes für den Versuchsbetrieb die begrenzte Standzeit der Anlage, bedingt in erster Linie durch die hohe Beanspruchung der Materialien, insbesondere der Turbomaschinenbeschaufelung, nicht erwähnt. Für die Auslegung wurde eine Nutzungstemperatur von 850°C bei 10.000 Betriebsstunden zugrunde gelegt. Dabei beträgt die rechnerische Lebensdauer für die Beschaufelung ca. 30.000 Betriebsstunden. Bei Erhöhung der Temperatur wird die Lebensdauer jedoch erheblich gemindert. So fällt die rechnerische Standzeit der Beschaufelung bei einer Heißgastemperatur von 1000°C auf ca. 600 Stunden ab. Dieser Abfall ist bedingt durch den Abfall der Zeitstandsfestigkeitswerte für die verwendete Beschaufelung aus Nimocast 713 LC. Es ist daraus zu folgern, daß die HHV-Anlage einmal im Hinblick auf die Betriebskosten und zum anderen im Hinblick auf die vorher erläuterte Standzeitbegrenzung der Turbomaschinenbeschaufelung nicht prädestiniert ist für Dauerstandsuntersuchungen, insbesondere nicht im Temperaturbereich von oberhalb 850°C .

6. Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt die Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage. Mit dem Bau dieser Anlage wurde 1972 von Firma BBC Mannheim im Auftrag der Kernforschungsanlage Jülich begonnen. Ende 1976 sind die Montagearbeiten an der Anlage soweit zum Abschluß gebracht, daß die Inbetriebnahme der Anlage ab Anfang 1977 anlaufen kann.

Das Schaltungskonzept für die Anlage, das mit einer Turbomaschine, bestehend aus einem Turbinen- und Verdichterteil, beide auf hohem Temperaturniveau arbeitend, deutlich vom üblichen Konzept des geschlossenen Gasturbinenkreislaufs abweicht, wurde unter dem Gesichtspunkt, optimale Versuchsbedingungen für Komponententests an HHT-Kraftwerkskomponenten zu schaffen, konzipiert. Auch sollte damit die Möglichkeit geschaffen werden, die Betriebssicherheit einer unter weitgehenden HHT-Gesichtspunkten ausgelegten Maschine zu demon-

strieren.

Im Rahmen des HHT-Projektes wurden teilweise auch speziell für die HHV-Anlage Voruntersuchungen durchgeführt. Mit diesen Voruntersuchungen wurden wesentliche Voraussetzungen für den Bau der Anlage und der Turbomaschine, die sich ansonsten weitgehend auf die Technologie der offenen Gasturbine abstützen, geschaffen. Von diesen Voruntersuchungen werden Materialuntersuchungen, Untersuchungen an kompletten Heißgasleitungselementen, Untersuchungen am Wellendichtungsprüfstand, Voruntersuchungen an einer Probebeschaukelung sowie eine Reihe von anderen Begleituntersuchungen erwähnt.

Bei der Beschreibung der Anlage wird zunächst das Kreislaufschema und die Anlagenanordnung vorgestellt. Es wird sodann auf die Einzelkomponenten eingegangen, wobei den Komponenten besondere Bedeutung beigemessen wird, die als HHT-typisch anzusprechen sind, während die Anlagenteile in konventioneller Technik Erwähnung finden, ohne auf ihre speziellen konstruktiven Einzelheiten im einzelnen einzugehen.

Auf das vorgesehene Untersuchungsprogramm für die HHV-Anlage in der Phase IB des HHT-Projektes wird kurz eingegangen. Es wird sodann das Potential dieser Versuchsanlage hinsichtlich des möglichen Einsatzes von Testkomponenten und bezüglich der strömungstechnischen und thermodynamischen Randbedingungen herausgestellt. Beim weitgehend einmaligen Potential, was die Anlage in diese Richtung bietet, bleiben die Gesichtspunkte, die durch Lebensdauereinschränkung bei erhöhten Kreislauftemperaturen gegeben sind, nicht unerwähnt.

7. Literaturangaben

- /1/ Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage (HHV)
HHT 3 (projektintern), 1972

- /2/ Weiskopf, H.:
Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage
BBC-Nachrichten Bd. 55 (1973) H. 10

- /3/ Krämer, H.; Noack, G.:
Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage HHV
KFA-Jahresbericht 1973

- /4/ Die Hochtemperatur-Helium-Versuchsanlage (HHV-Anlage)
BBC-Druckschrift D KW 50736 D

- /5/ Noack, G.; Terkessidis, J.; Zenker, P.:
Großversuche an Komponenten von HTR-Einkreisanlagen
Nuclex 1975, Fachtagung Nr. 2

- /6/ Noack, G.; Terkessidis, J.; Zenker, P.:
Significance of the helium turbine power plant at Oberhausen (EVO)
and of the high-temperature helium test facility at Jülich (HHV)
for the development of the HTR direct-cycle system (HHT)
IAEA-SM-200/26

- /7/ Abschlußbericht über Wellendichtungsprüfstand bei BBC-D in Phase I
des HHT-Projektes
HHT 18 (projektintern), 1975

- /8/ Bröckerhoff, P.; Scholz, F.:
Untersuchungen an zwei gestopften Faserisolierungen in einem
horizontalen Druckrohr
Jül-1241, Oktober 1975

- /9/ Bruners, R.; Lang, H.; Noack, G.:
Untersuchungen an einer Faser-Isolierung in der ARGAS-Anlage
Jül-1227, August 1975

- /10/ Bröckerhoff, P.:
 Testisolierungen für die Heißgasleitung der HHV-Anlage
 Jül-1334, Sept. 1976
- /11/ Bröckerhoff, P.; Scholz, F.:
 Untersuchungen an einer Folienisolierung in einem horizontalen
 Druckrohr
 Jül-1109-RB, Sept. 1974